

# Лекция 13

1. Элементарные частицы.

Стандартная модель.

2. Сильное взаимодействие: кварки и глюоны.

3. Обзор инструментов физики частиц.

# Часть 1. «Зоопарк» элементарных частиц

# «Зоопарк» элементарных частиц

| Symbol ↕        | Quark content ↕ | Rest mass<br>(MeV/c <sup>2</sup> ) ↕ |
|-----------------|-----------------|--------------------------------------|
| $p, p^+, N^+$   | uud             | 938.272 046(21) <sup>[a]</sup>       |
| $n, n^0, N^0$   | udd             | 939.565 379(21) <sup>[a]</sup>       |
| $\Lambda^0$     | uds             | 1 115.683 ± 0.006                    |
| $\Lambda_c^+$   | udc             | 2 286.46 ± 0.14                      |
| $\Lambda_b^0$   | udb             | 5 619.4 ± 0.6                        |
| $\Sigma^+$      | uus             | 1 189.37 ± 0.07                      |
| $\Sigma^0$      | uds             | 1 192.642 ± 0.024                    |
| $\Sigma^-$      | dds             | 1 197.449 ± 0.030                    |
| $\Sigma_c^{++}$ | uuc             | 2 453.98 ± 0.16                      |

# «Зона» барионных частиц

| Symbol ⇅      | Quark content |              |     |
|---------------|---------------|--------------|-----|
| $p, p^+, N^+$ | uuu           | $\Sigma_c^+$ | udc |
| $n, n^0, N^0$ | uud           | $\Sigma_c^0$ | ddc |
| $\Lambda^0$   | uud           | $\Sigma_b^+$ | uub |
| $\Lambda_c^+$ | uud           | $\Sigma_b^0$ | udb |
| $\Lambda_b^0$ | uud           | $\Sigma_b^-$ | ddb |
| $\Sigma^+$    | uuu           | $\Xi^0$      | uss |
| $\Sigma^0$    | uud           | $\Xi^-$      | dss |
| $\Sigma^-$    | ddu           | $\Xi_c^+$    | usc |
| $\Sigma^{++}$ | uuu           | $\Xi_c^0$    | dsc |
|               |               | $\Xi_c^+$    | usc |
|               |               | $\Xi_c^0$    | dsc |



# «Зона» барионных частиц

| Symbol ↕        | Quark content |              |     |                        |     |                    |
|-----------------|---------------|--------------|-----|------------------------|-----|--------------------|
| $p, p^+, N^+$   | uuu           | $\Sigma_c^+$ | udc | $2\,452.9 \pm 0.4$     |     |                    |
| $n, n^0, N^0$   | uud           | $\Sigma_c^0$ | ddc | $\Delta^{++}(1232)$    | uuu | $1232 \pm 2$       |
| $\Lambda^0$     | uud           | $\Sigma_b^+$ | uub | $\Delta^+(1232)$       | uud | $1232 \pm 2$       |
| $\Lambda_c^+$   | uud           | $\Sigma_b^0$ | udb | $\Delta^0(1232)$       | udd | $1232 \pm 2$       |
| $\Lambda_b^0$   | uud           | $\Sigma_b^-$ | ddb | $\Delta^-(1232)$       | ddd | $1232 \pm 2$       |
| $\Sigma^+$      | uuu           | $\Xi^0$      | uss | $\Sigma^{*+}(1385)$    | uus | $1\,382.8 \pm 0.4$ |
| $\Sigma^0$      | uud           | $\Xi^-$      | dss |                        |     |                    |
| $\Sigma^-$      | ddu           | $\Xi_c^+$    | usc | $\Sigma^{*0}(1385)$    | uds | $1\,383.7 \pm 1.0$ |
| $\Sigma_c^{++}$ | uuu           | $\Xi_c^0$    | dsc | $\Sigma^{*-}(1385)$    | dds | $1\,387.2 \pm 0.5$ |
|                 |               | $\Xi_c^+$    | usc | $\Sigma_c^{*++}(2520)$ | uuc | $2\,517.9 \pm 0.6$ |
|                 |               | $\Xi_c^0$    | dsc | $\Sigma_c^{*+}(2520)$  | udc | $2\,517.5 \pm 2.3$ |

# «Зона» барионных частиц

| Symbol          | Quark content | Mass (MeV)           | Quark content   | Mass (MeV)       |
|-----------------|---------------|----------------------|-----------------|------------------|
| $p, p^+, N^+$   | uud           | $938.272 \pm 0.023$  | $\Sigma_c^+$    | $2452.9 \pm 0.4$ |
| $n, n^0, N^0$   | udd           | $939.565 \pm 0.024$  | $\Sigma_c^0$    | $2455.5 \pm 0.4$ |
| $\Lambda^0$     | uds           | $1115.683 \pm 0.024$ | $\Sigma_c^{++}$ | $2457.3 \pm 0.4$ |
| $\Lambda_c^+$   | uudc          | $2284.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2459.7 \pm 0.4$ |
| $\Lambda_b^0$   | udbc          | $5619.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2461.1 \pm 0.4$ |
| $\Sigma^+$      | uud           | $1189.37 \pm 0.18$   | $\Sigma_c^{*+}$ | $2462.5 \pm 0.4$ |
| $\Sigma^0$      | uds           | $1192.642 \pm 0.18$  | $\Sigma_c^{*0}$ | $2463.9 \pm 0.4$ |
| $\Sigma^-$      | dds           | $1193.699 \pm 0.18$  | $\Sigma_c^{*-}$ | $2465.3 \pm 0.4$ |
| $\Sigma_c^{++}$ | uuc           | $2455.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2466.7 \pm 0.4$ |
| $\Sigma_c^{*+}$ | uuc           | $2456.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2468.1 \pm 0.4$ |
| $\Sigma_c^{*0}$ | uds           | $2457.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2469.5 \pm 0.4$ |
| $\Sigma_c^{*-}$ | dds           | $2459.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2470.9 \pm 0.4$ |
| $\Lambda^0$     | uds           | $1115.683 \pm 0.024$ | $\Sigma_c^{*0}$ | $2472.3 \pm 0.4$ |
| $\Lambda_c^+$   | uudc          | $2284.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2473.7 \pm 0.4$ |
| $\Lambda_b^0$   | udbc          | $5619.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2475.1 \pm 0.4$ |
| $\Delta^+$      | uud           | $1232 \pm 2$         | $\Sigma_c^{*0}$ | $2476.5 \pm 0.4$ |
| $\Delta^0$      | udd           | $1232 \pm 2$         | $\Sigma_c^{*-}$ | $2477.9 \pm 0.4$ |
| $\Delta^-$      | ddd           | $1232 \pm 2$         | $\Sigma_c^{*+}$ | $2479.3 \pm 0.4$ |
| $\Delta^{++}$   | uuu           | $1232 \pm 2$         | $\Sigma_c^{*0}$ | $2480.7 \pm 0.4$ |
| $\Delta^+$      | uud           | $1232 \pm 2$         | $\Sigma_c^{*-}$ | $2482.1 \pm 0.4$ |
| $\Delta^0$      | udd           | $1232 \pm 2$         | $\Sigma_c^{*+}$ | $2483.5 \pm 0.4$ |
| $\Delta^-$      | ddd           | $1232 \pm 2$         | $\Sigma_c^{*0}$ | $2484.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi^0$         | uus           | $1314.84 \pm 0.20$   | $\Sigma_c^{*+}$ | $2486.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi^+$         | uus           | $1321.31 \pm 0.20$   | $\Sigma_c^{*0}$ | $2487.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi^-$         | dds           | $1321.31 \pm 0.20$   | $\Sigma_c^{*-}$ | $2489.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2455.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2490.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2456.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2491.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2457.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2493.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2459.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2494.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2460.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2496.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2462.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2497.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2463.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2498.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2464.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2500.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2466.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2501.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2467.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2503.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2469.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2504.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2470.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2505.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2471.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2507.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2473.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2508.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2474.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2510.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2476.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2511.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2477.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2512.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2478.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2514.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2480.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2515.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2481.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2517.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2483.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2518.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2484.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2519.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2485.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2521.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2487.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2522.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2488.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2524.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2490.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2525.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2491.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2526.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2492.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2528.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2494.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2529.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2495.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2531.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2497.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2532.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2498.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2533.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2499.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2535.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2501.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2536.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2502.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2538.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2504.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2539.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2505.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2540.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2506.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2542.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2508.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2543.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2509.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2545.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2511.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2546.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2512.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2547.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2513.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2549.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2515.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2550.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2516.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2552.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2518.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2553.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2519.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2554.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2520.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2556.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2522.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2557.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2523.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2559.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2525.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2560.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2526.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2561.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2527.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2563.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2529.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2564.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2530.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2566.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2532.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2567.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2533.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2568.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2534.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2570.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2536.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2571.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2537.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2573.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2539.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2574.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2540.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2575.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2541.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2577.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2543.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2578.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2544.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2580.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2546.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2581.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2547.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2582.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2548.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2584.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2550.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2585.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2551.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2587.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2553.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2588.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2554.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2589.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2555.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2591.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2557.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2592.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2558.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2594.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2560.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2595.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2561.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2596.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2562.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2598.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2564.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2599.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2565.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2601.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2567.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2602.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2568.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2603.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2569.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2605.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2571.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2606.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2572.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2608.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2574.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2609.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2575.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2610.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2576.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2612.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2578.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2613.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2579.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2615.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2581.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2616.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2582.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2617.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2583.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2619.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2585.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2620.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2586.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2622.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2588.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2623.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2589.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2624.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2590.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2626.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2592.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2627.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2593.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2629.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2595.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2630.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2596.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2631.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2597.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2633.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2599.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2634.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2600.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2636.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2602.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2637.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2603.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2638.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2604.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2640.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2606.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2641.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2607.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2643.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2609.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2644.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2610.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2645.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2611.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2647.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2613.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2648.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2614.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2650.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2616.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2651.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2617.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2652.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2618.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2654.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2620.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2655.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2621.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2657.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2623.0 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2658.5 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2624.4 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2659.9 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2625.8 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*-}$ | $2661.3 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*0}$    | uus           | $2627.2 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*+}$ | $2662.7 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2628.6 \pm 0.4$     | $\Sigma_c^{*0}$ | $2664.1 \pm 0.4$ |
| $\Xi_c^{*+}$    | uus           | $2630.0 \pm 0.4</$   |                 |                  |

# «Зоопарк» элементарных частиц

NEWS: 2021 update of Listings and Summary Tables available

PDG particle data group

## The Review of Particle Physics (2021)

P.A. Zyla *et al.* (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020) and 2021 update.

pdgLive - Interactive Listings

Summary Tables

Reviews, Tables, Plots (2020)

Particle Listings

Errata

Order PDG Products

Topical Index

Downloads

Prev. Editions (& Errata) 1957-2020

PDG Outreach

Results provided by Google

| Symbol       | Quark content | Mass (MeV)                           |
|--------------|---------------|--------------------------------------|
| $\Sigma_c^+$ | udc           | $2452.9 \pm 0.4$                     |
| $\Sigma_c^0$ | ddc           | $\Delta^{++}(1232)$ uuu $1232 \pm 2$ |
|              |               | $\Delta^+(1232)$ uud $1232 \pm 2$    |
|              |               | udd $1232 \pm 2$                     |
|              |               | ddd $1232 \pm 2$                     |

| particles       |         |      |                | $\Lambda$ particles |      |             |         | $\Sigma$ particles |             |         |      | $\Xi$ and $\Omega$ particles |         |      |  |
|-----------------|---------|------|----------------|---------------------|------|-------------|---------|--------------------|-------------|---------|------|------------------------------|---------|------|--|
| $\Lambda$       | $1/2^+$ | **** | $\Sigma^+$     | $1/2^+$             | **** | $\Xi^0$     | $1/2^+$ | ****               | $\Xi^0$     | $1/2^+$ | **** | $\Xi^0$                      | $1/2^+$ | **** |  |
| $\Lambda(1405)$ | $1/2^-$ | **** | $\Sigma^0$     | $1/2^+$             | **** | $\Xi^-$     | $1/2^+$ | ****               | $\Xi(1530)$ | $3/2^+$ | **** | $\Xi(1530)$                  | $3/2^+$ | **** |  |
| $\Lambda(1520)$ | $3/2^-$ | **** | $\Sigma^-$     | $1/2^+$             | **** | $\Xi(1620)$ | $3/2^+$ | ****               | $\Xi(1620)$ | $3/2^+$ | **** | $\Xi(1620)$                  | $3/2^+$ | **** |  |
| $\Lambda(1600)$ | $1/2^+$ | ***  | $\Sigma(1385)$ | $3/2^+$             | **** | $\Xi(1690)$ | $3/2^+$ | ****               | $\Xi(1690)$ | $3/2^+$ | **** | $\Xi(1690)$                  | $3/2^+$ | **** |  |
| $\Lambda(1670)$ | $1/2^-$ | **** | $\Sigma(1480)$ | $3/2^+$             | **** | $\Xi(1820)$ | $3/2^+$ | ****               | $\Xi(1820)$ | $3/2^+$ | **** | $\Xi(1820)$                  | $3/2^+$ | **** |  |
| $\Lambda(1690)$ | $3/2^-$ | **** | $\Sigma(1560)$ | $3/2^+$             | **** | $\Xi(1950)$ | $3/2^+$ | ****               | $\Xi(1950)$ | $3/2^+$ | **** | $\Xi(1950)$                  | $3/2^+$ | **** |  |
| $\Lambda(1710)$ | $1/2^+$ | *    | $\Sigma(1580)$ | $3/2^-$             | *    | $\Xi(2030)$ | $3/2^+$ | ****               | $\Xi(2030)$ | $3/2^+$ | **** | $\Xi(2030)$                  | $3/2^+$ | **** |  |
| $\Lambda(1800)$ | $1/2^-$ | ***  | $\Sigma(1620)$ | $1/2^-$             | *    | $\Xi(2030)$ | $3/2^+$ | ****               | $\Xi(2030)$ | $3/2^+$ | **** | $\Xi(2030)$                  | $3/2^+$ | **** |  |

|     |                  |
|-----|------------------|
| udc | $2517.5 \pm 2.3$ |
|-----|------------------|

Надежный «официальный путеводитель»:

**Particle Data Group**

<http://pdg.lbl.gov/>

Удобный сайт:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/parcon.html>

# Частицы Стандартной модели

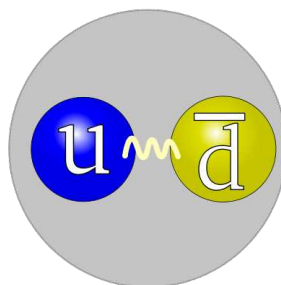
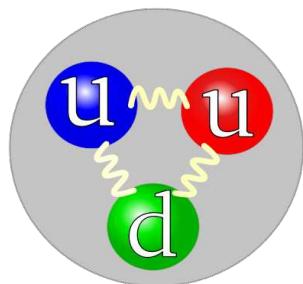
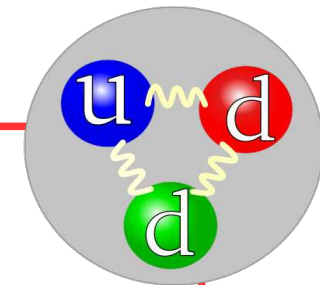
|                    |                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                       |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <div>LEPTONS</div> | <div> <div>mass → <math>\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2</math></div> <div>charge → <math>2/3</math></div> <div>spin → <math>1/2</math></div> </div> <div>u</div> <div>up</div>              | <div> <div>mass → <math>\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2</math></div> <div>charge → <math>2/3</math></div> <div>spin → <math>1/2</math></div> </div> <div>c</div> <div>charm</div>         | <div> <div>mass → <math>\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2</math></div> <div>charge → <math>2/3</math></div> <div>spin → <math>1/2</math></div> </div> <div>t</div> <div>top</div>          | <div> <div>mass → 0</div> <div>charge → 0</div> <div>spin → 1</div> </div> <div>g</div> <div>gluon</div>                                                    | <div> <div>mass → <math>\approx 126 \text{ GeV}/c^2</math></div> <div>charge → 0</div> <div>spin → 0</div> </div> <div>H</div> <div>Higgs boson</div> |
|                    | <div> <div>mass → <math>\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2</math></div> <div>charge → <math>-1/3</math></div> <div>spin → <math>1/2</math></div> </div> <div>d</div> <div>down</div>           | <div> <div>mass → <math>\approx 95 \text{ MeV}/c^2</math></div> <div>charge → <math>-1/3</math></div> <div>spin → <math>1/2</math></div> </div> <div>s</div> <div>strange</div>         | <div> <div>mass → <math>\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2</math></div> <div>charge → <math>-1/3</math></div> <div>spin → <math>1/2</math></div> </div> <div>b</div> <div>bottom</div>        | <div> <div>mass → 0</div> <div>charge → 0</div> <div>spin → 1</div> </div> <div><math>\gamma</math></div> <div>photon</div>                                 |                                                                                                                                                       |
|                    | <div> <div>mass → <math>0.511 \text{ MeV}/c^2</math></div> <div>charge → -1</div> <div>spin → <math>1/2</math></div> </div> <div>e</div> <div>electron</div>                            | <div> <div>mass → <math>105.7 \text{ MeV}/c^2</math></div> <div>charge → -1</div> <div>spin → <math>1/2</math></div> </div> <div><math>\mu</math></div> <div>muon</div>                 | <div> <div>mass → <math>1.777 \text{ GeV}/c^2</math></div> <div>charge → -1</div> <div>spin → <math>1/2</math></div> </div> <div><math>\tau</math></div> <div>tau</div>                 | <div> <div>mass → <math>91.2 \text{ GeV}/c^2</math></div> <div>charge → 0</div> <div>spin → 1</div> </div> <div>Z</div> <div>Z boson</div>                  | <div>GAUGE BOSONS</div>                                                                                                                               |
|                    | <div> <div>mass → <math>&lt; 2.2 \text{ eV}/c^2</math></div> <div>charge → 0</div> <div>spin → <math>1/2</math></div> </div> <div><math>\nu_e</math></div> <div>electron neutrino</div> | <div> <div>mass → <math>&lt; 0.17 \text{ MeV}/c^2</math></div> <div>charge → 0</div> <div>spin → <math>1/2</math></div> </div> <div><math>\nu_\mu</math></div> <div>muon neutrino</div> | <div> <div>mass → <math>&lt; 15.5 \text{ MeV}/c^2</math></div> <div>charge → 0</div> <div>spin → <math>1/2</math></div> </div> <div><math>\nu_\tau</math></div> <div>tau neutrino</div> | <div> <div>mass → <math>80.4 \text{ GeV}/c^2</math></div> <div>charge → <math>\pm 1</math></div> <div>spin → 1</div> </div> <div>W</div> <div>W boson</div> |                                                                                                                                                       |

# Частицы Стандартной модели

|                                                   |                                                                      |                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                      |                                                                                                                                |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <div> <div>QUARKS</div> <div>LEPTONS</div> </div> | <div> <div>mass →</div> <div>charge →</div> <div>spin →</div> </div> | <div> <div><math>\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2</math></div> <div><math>2/3</math></div> <div><math>1/2</math></div> <div>u</div> <div>up</div> </div>              | <div> <div><math>\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2</math></div> <div><math>2/3</math></div> <div><math>1/2</math></div> <div>c</div> <div>charm</div> </div>         | <div> <div><math>\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2</math></div> <div><math>2/3</math></div> <div><math>1/2</math></div> <div>t</div> <div>top</div> </div>          | <div> <div>0</div> <div>0</div> <div>1</div> <div>g</div> <div>gluon</div> </div>                                                    | <div> <div><math>\approx 126 \text{ GeV}/c^2</math></div> <div>0</div> <div>0</div> <div>H</div> <div>Higgs boson</div> </div> |
|                                                   |                                                                      | <div> <div><math>\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2</math></div> <div><math>-1/3</math></div> <div><math>1/2</math></div> <div>d</div> <div>down</div> </div>           | <div> <div><math>\approx 95 \text{ MeV}/c^2</math></div> <div><math>-1/3</math></div> <div><math>1/2</math></div> <div>s</div> <div>strange</div> </div>         | <div> <div><math>\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2</math></div> <div><math>-1/3</math></div> <div><math>1/2</math></div> <div>b</div> <div>bottom</div> </div>      | <div> <div>0</div> <div>0</div> <div>1</div> <div><math>\gamma</math></div> <div>photon</div> </div>                                 |                                                                                                                                |
|                                                   |                                                                      | <div> <div><math>0.511 \text{ MeV}/c^2</math></div> <div>-1</div> <div><math>1/2</math></div> <div>e</div> <div>electron</div> </div>                            | <div> <div><math>105.7 \text{ MeV}/c^2</math></div> <div>-1</div> <div><math>1/2</math></div> <div><math>\mu</math></div> <div>muon</div> </div>                 | <div> <div><math>1.777 \text{ GeV}/c^2</math></div> <div>-1</div> <div><math>1/2</math></div> <div><math>\tau</math></div> <div>tau</div> </div>                 | <div> <div><math>91.2 \text{ GeV}/c^2</math></div> <div>0</div> <div>1</div> <div>Z</div> <div>Z boson</div> </div>                  |                                                                                                                                |
|                                                   |                                                                      | <div> <div><math>&lt; 2.2 \text{ eV}/c^2</math></div> <div>0</div> <div><math>1/2</math></div> <div><math>\nu_e</math></div> <div>electron neutrino</div> </div> | <div> <div><math>&lt; 0.17 \text{ MeV}/c^2</math></div> <div>0</div> <div><math>1/2</math></div> <div><math>\nu_\mu</math></div> <div>muon neutrino</div> </div> | <div> <div><math>&lt; 15.5 \text{ MeV}/c^2</math></div> <div>0</div> <div><math>1/2</math></div> <div><math>\nu_\tau</math></div> <div>tau neutrino</div> </div> | <div> <div><math>80.4 \text{ GeV}/c^2</math></div> <div><math>\pm 1</math></div> <div>1</div> <div>W</div> <div>W boson</div> </div> | <div>GAUGE BOSONS</div>                                                                                                        |

# Кварки, внутренняя структура нуклонов

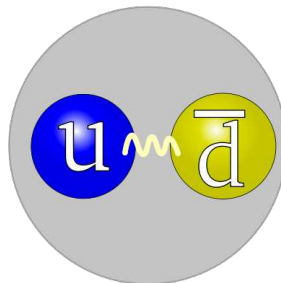
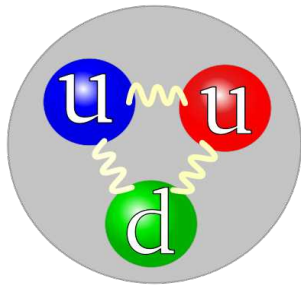
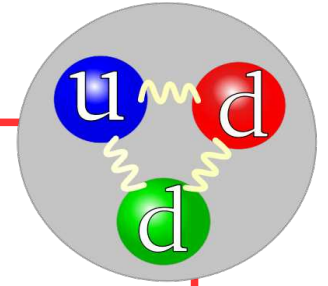
Экспериментальные факты:



# Кварки, внутренняя структура нуклонов

Экспериментальные факты:

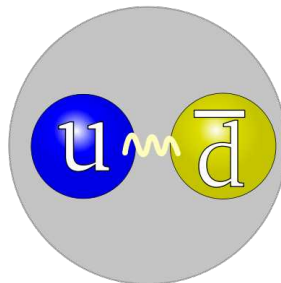
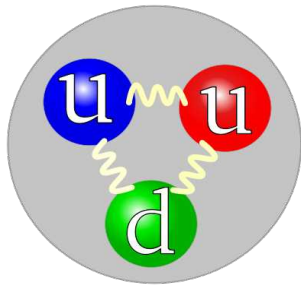
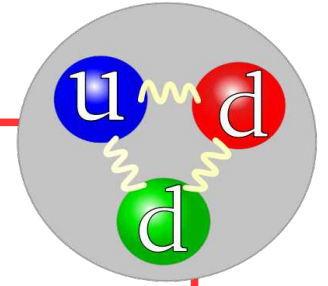
- Магнитный момент нейтрона



# Кварки, внутренняя структура нуклонов

Экспериментальные факты:

- Магнитный момент нейтрона
- g-фактор протона 5.585694713(46), а не 2

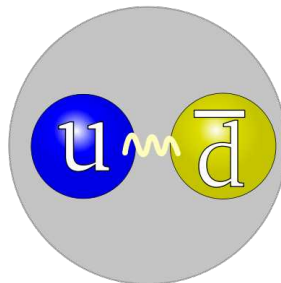
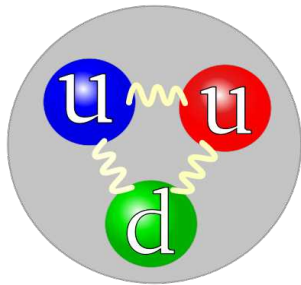
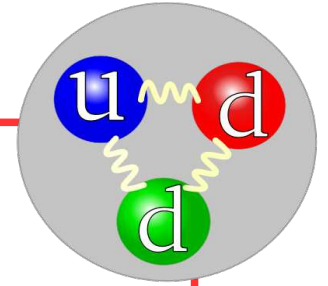




# Кварки, внутренняя структура нуклонов

Экспериментальные факты:

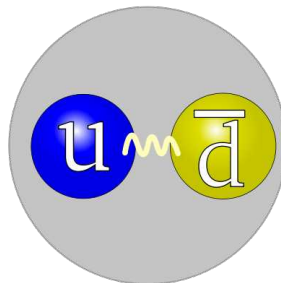
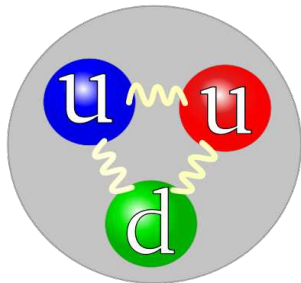
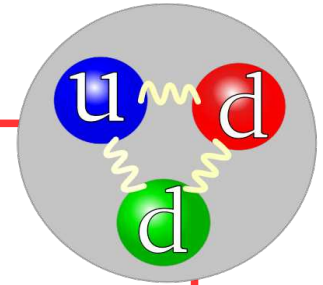
- Магнитный момент нейтрона
- g-фактор протона 5.585694713(46), а не 2
- Резонансы — возбужденные состояния частиц



# Кварки, внутренняя структура нуклонов

Экспериментальные факты:

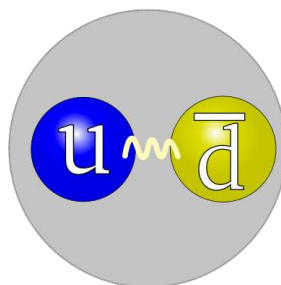
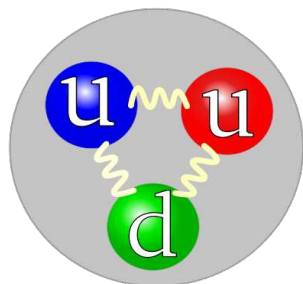
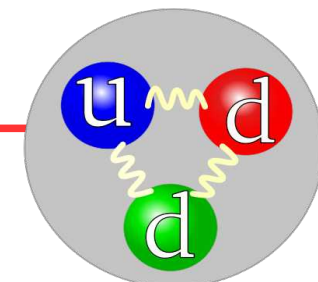
- Магнитный момент нейтрона
- g-фактор протона 5.585694713(46), а не 2
- Резонансы — возбужденные состояния частиц
- Сечения рассеяния на высоких энергиях



# Кварки, внутренняя структура нуклонов

Экспериментальные факты:

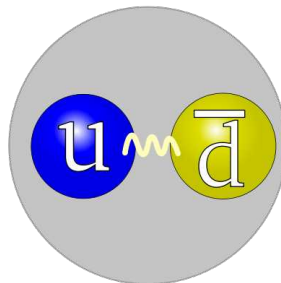
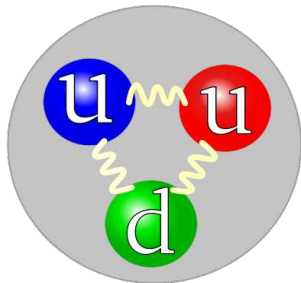
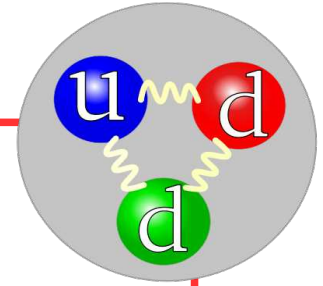
- Магнитный момент нейтрона
- g-фактор протона 5.585694713(46), а не 2
- Резонансы — возбужденные состояния частиц
- Сечения рассеяния на высоких энергиях
- Эквивалентность протона и нейтрона для ядерных сил



# Кварки, внутренняя структура нуклонов

Экспериментальные факты:

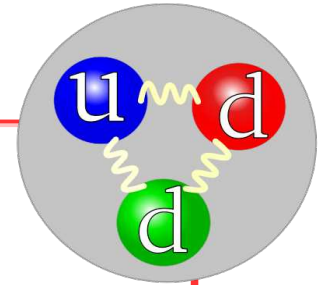
- Магнитный момент нейтрона
- g-фактор протона 5.585694713(46), а не 2
- Резонансы — возбужденные состояния частиц
- Сечения рассеяния на высоких энергиях
- Эквивалентность протона и нейтрона для ядерных сил
- Все тяжелые частицы описываются в кварковой модели



# Кварки, внутренняя структура нуклонов

Экспериментальные факты:

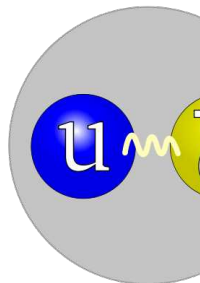
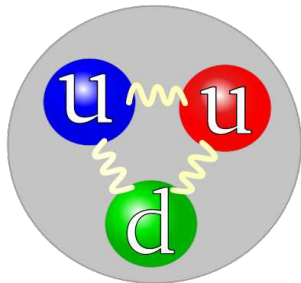
- Магнитный момент нейтрона
- g-фактор протона 5.585694713(46), а не 2
- Резонансы — возбужденные состояния частиц
- Сечения рассеяния на нуклонах
- Эквивалентность протона и нейтрона
- Все тяжелые частицы описаны в кварковой модели



Два кварка (кварк+антикварк) — мезоны

Три кварка — барионы

Экзотические, короткоживущие, но обнаруженные в экспериментах на ускорителях тетракварки и пентакварки

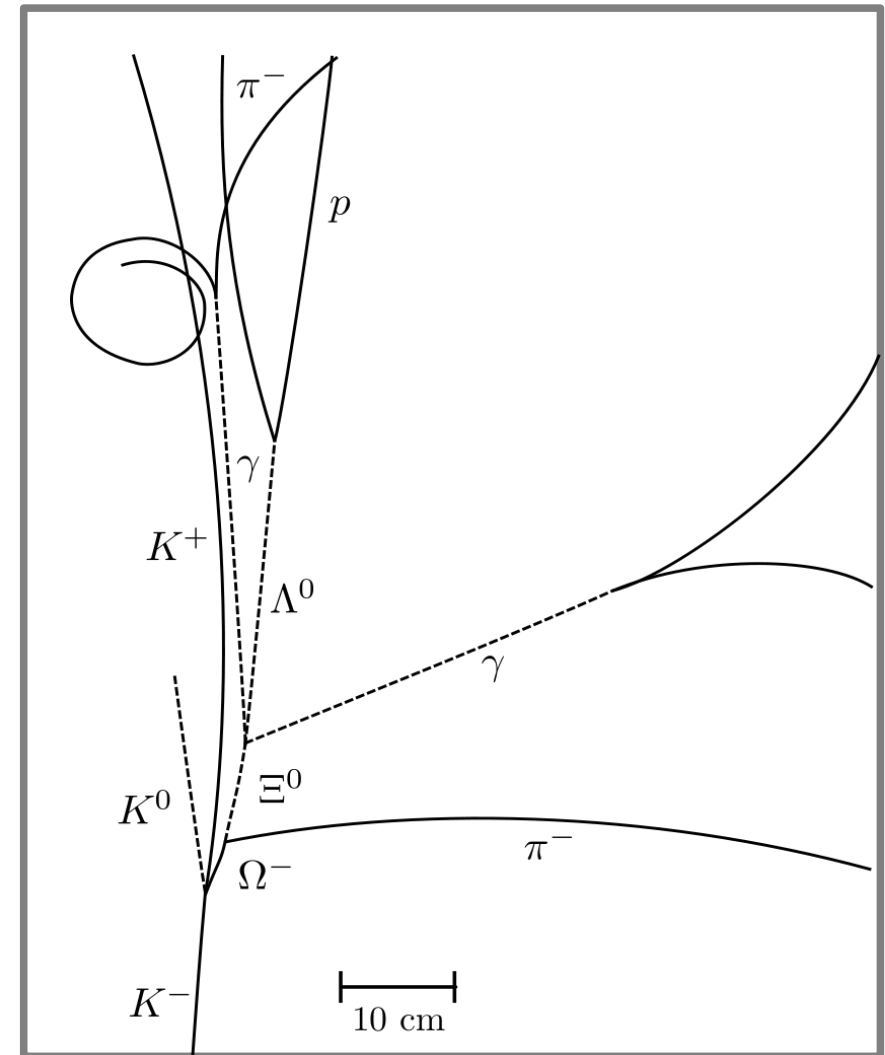
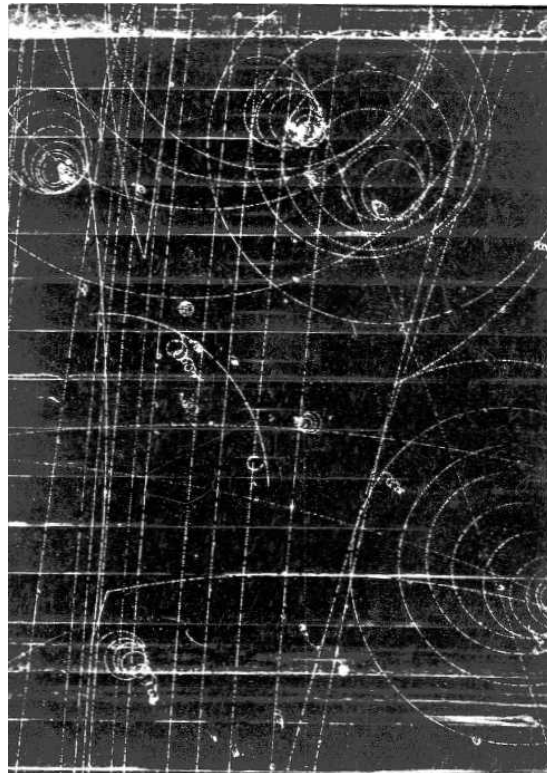


# Представление о цветовом заряде

$$\Omega^{-} = (sss)$$

$$\Delta^{++} = (uuu)$$

$$\Delta^{-} = (ddd)$$



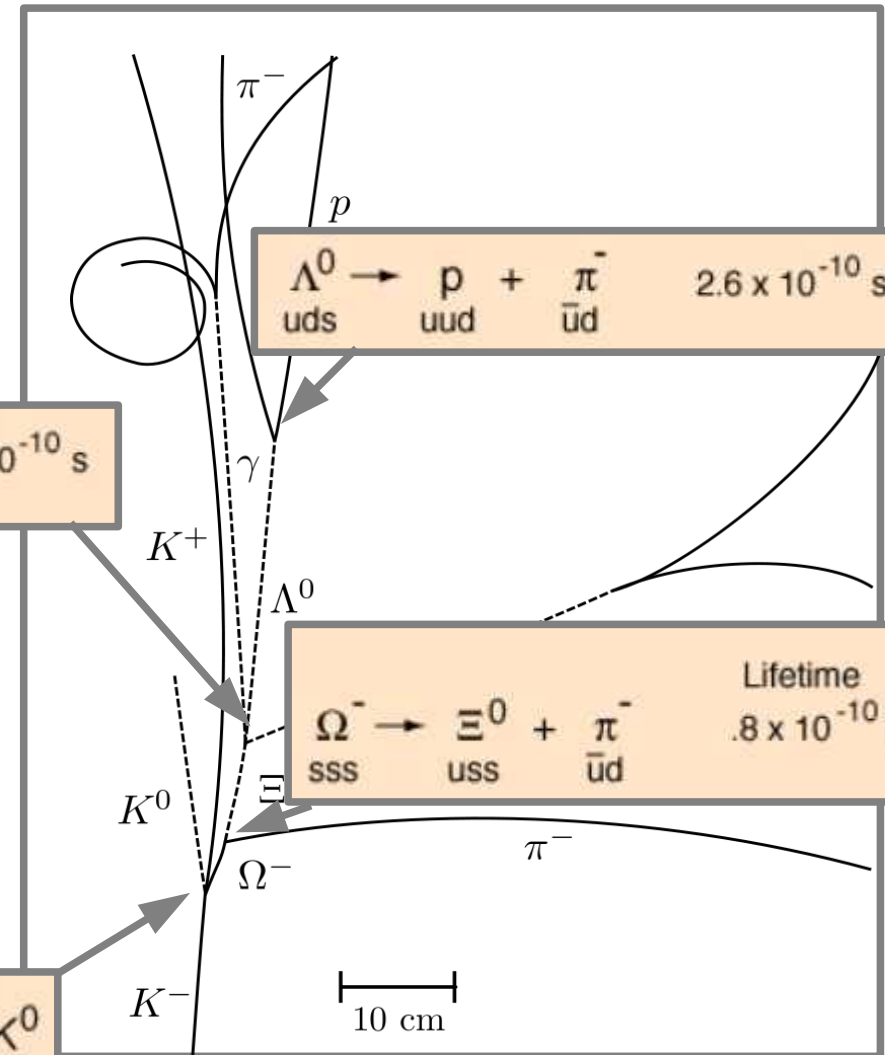
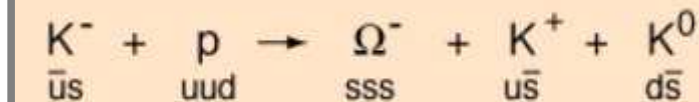
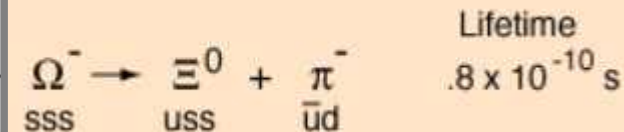
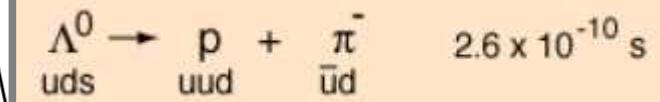
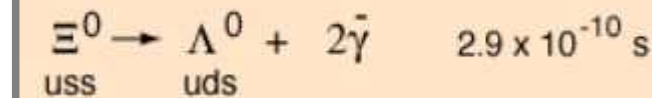
Bubble chamber trace of the first observed  $\Omega$  baryon event at Brookhaven National Laboratory

# Представление о цветовом заряде

$$\Omega^- = (sss)$$

$$\Delta^{++} = (uuu)$$

$$\Delta^- = (ddd)$$



Bubble chamber trace of the first observed  $\Omega$  baryon event at Brookhaven National Laboratory

# Представление о цветовом заряде

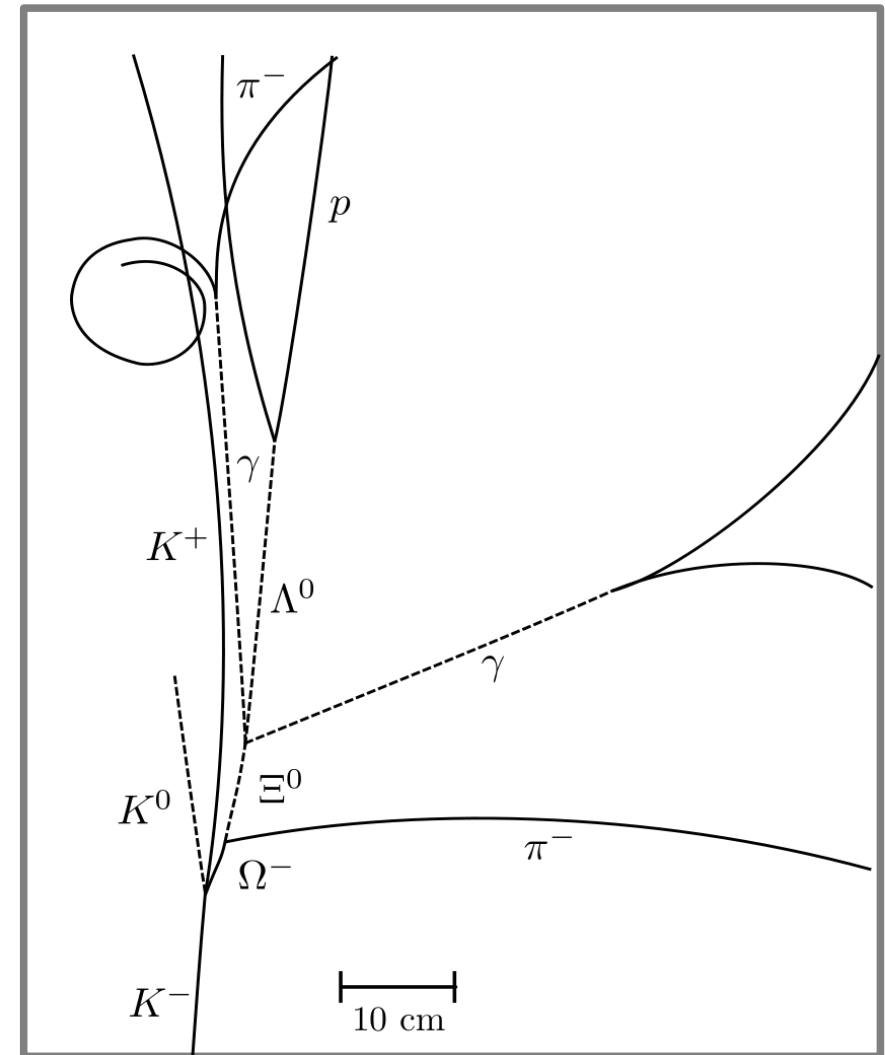
$$\Omega^- = (sss)$$

$$\Delta^{++} = (uuu)$$

$$\Delta^- = (ddd)$$

Эксперимент:

- Барионы со спином 3/2
- Это *основное* состояние тройки кварков
- Все 3 кварка в одном пространственном состоянии с  $L=0$ !



Bubble chamber trace of the first observed  $\Omega$  baryon event at Brookhaven National Laboratory



# Представление о цветовом заряде

$$\Omega^{-} = (sss)$$

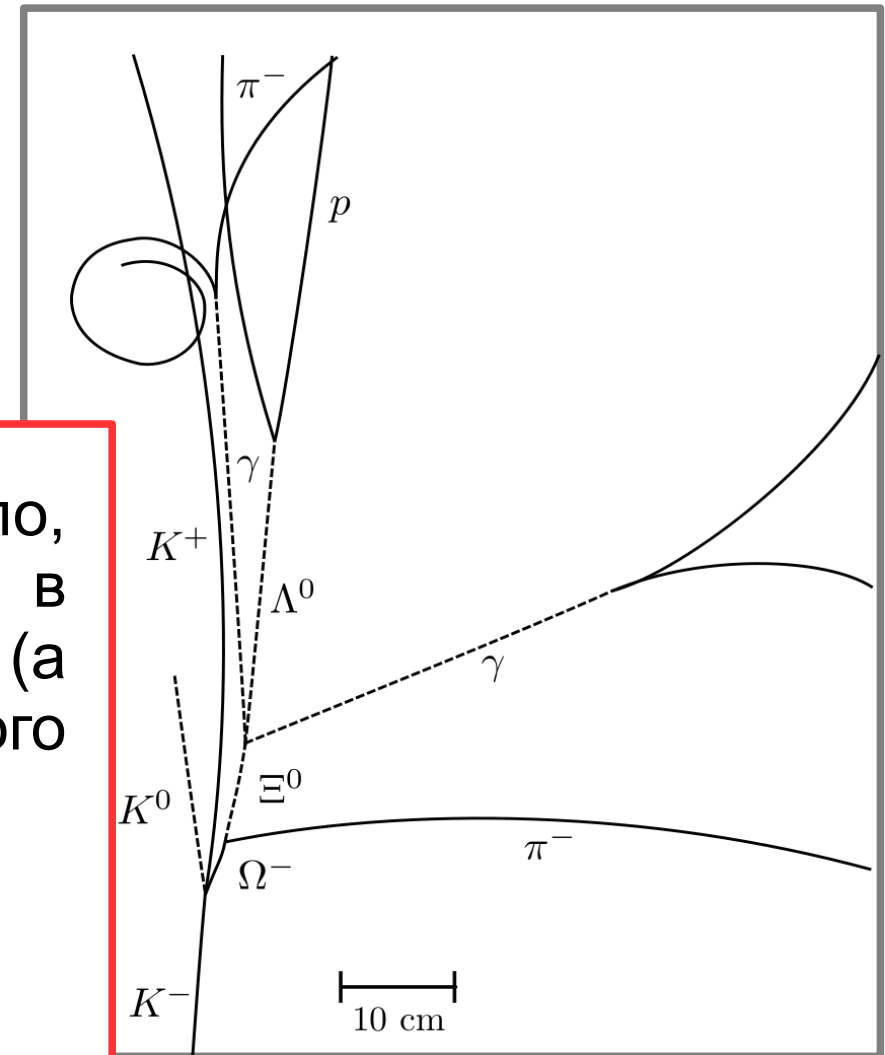
$$\Delta^{++} = (uuu)$$

$$\Delta^{-} = (ddd)$$

Есть ещё какое-то квантовое число, описывающее состояние кварка в нуклоне. Необходимо хотя бы три (а больше не нужно) значения этого квантового числа...

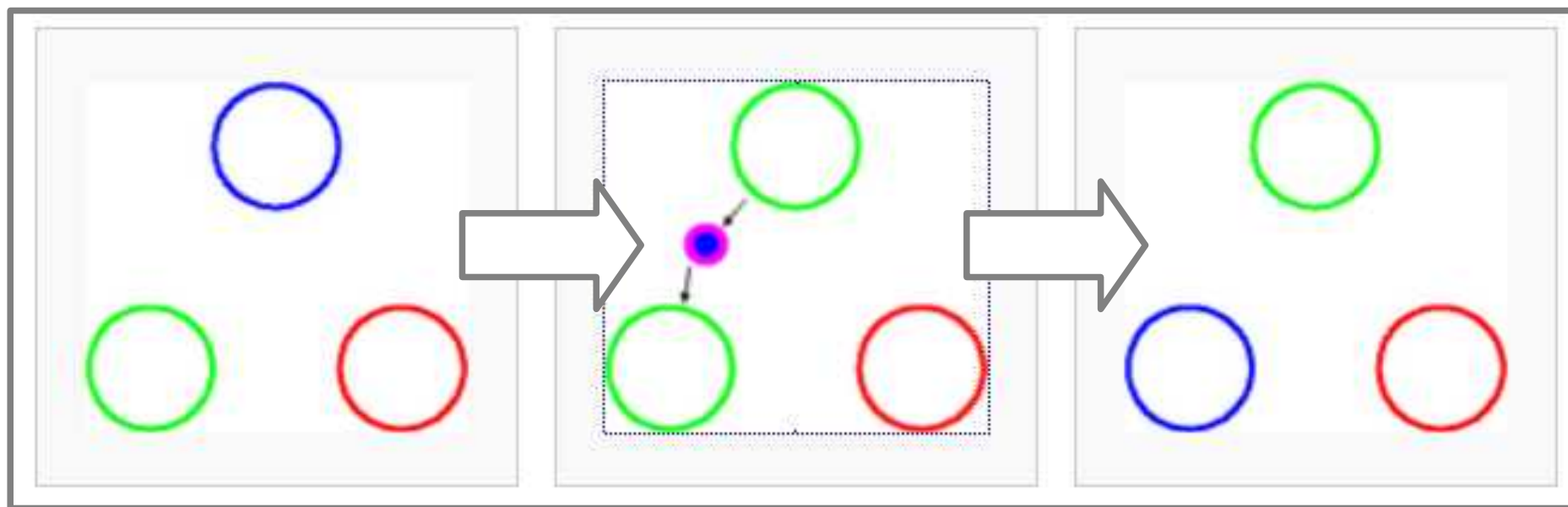
«Цвет»: R, G, B

... и «антицвет» anti-R, anti-G, anti-B



Bubble chamber trace of the first observed  $\Omega$  baryon event at Brookhaven National Laboratory

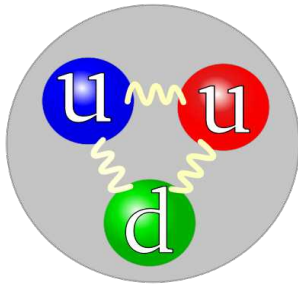
# Перенос сильного взаимодействия внутри частицы: глюоны



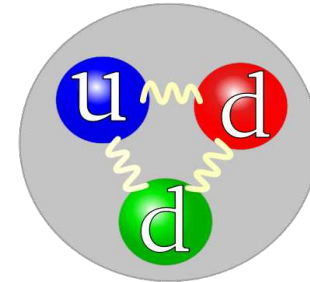
Частица в целом “бесцветная” - соответствует короткодействию ядерного взаимодействия: либо все три цвета RGB, либо пары цвет-антицвет

# Цветовой заряд и магнитные моменты протона и нейтрона

протон

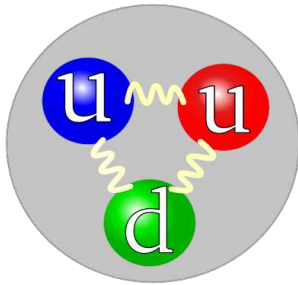


нейтрон

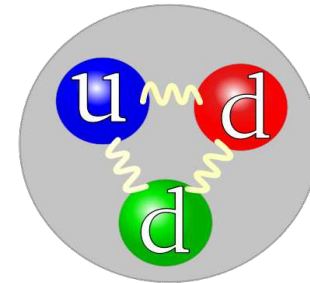


# Цветовой заряд и магнитные моменты протона и нейтрона

протон



нейтрон



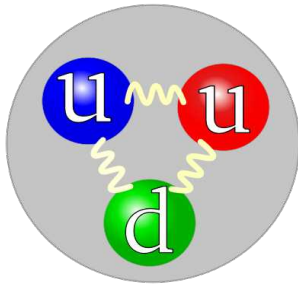
Предположения:

- $L=0$
- $m_u, m_d \approx M/3$
- магнитный момент кварка  $2[q/(2mc)]S$

$$\begin{aligned} u: \frac{+2e/3}{2(M/3)c} &= 2\mu_{\text{яд}} \\ d: \frac{-e/3}{2(M/3)c} &= -\mu_{\text{яд}} \end{aligned}$$

# Цветовой заряд и магнитные моменты протона и нейтрона

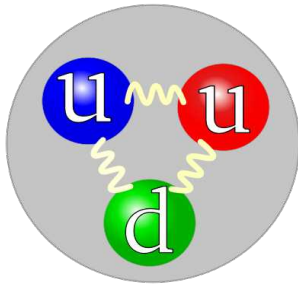
протон



- 2 эквивалентных u-кварка = запрет Паули
- $\Psi = \Phi(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \times \xi(\sigma_1, \sigma_2) \times \zeta(C_1, C_2)$

# Цветовой заряд и магнитные моменты протона и нейтрона

протон

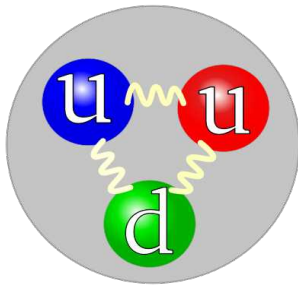


- 2 эквивалентных u-кварка = запрет Паули
- $\Psi = \Phi(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \times \xi(\sigma_1, \sigma_2) \times \zeta(C_1, C_2)$

чётная  
( $L=0$ )

# Цветовой заряд и магнитные моменты протона и нейтрона

протон



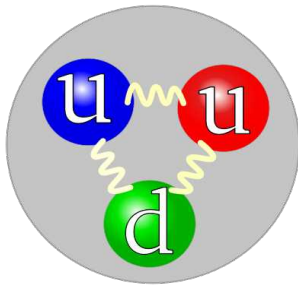
- 2 эквивалентных u-кварка = запрет Паули
- $\Psi = \Phi(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \times \xi(\sigma_1, \sigma_2) \times \zeta(C_1, C_2)$

чётная  
( $L=0$ )

нечётная  
(разные «цвета»,  
меняется при  
перестановке)

# Цветовой заряд и магнитные моменты протона и нейтрона

протон



- 2 эквивалентных u-кварка = запрет Паули
- $\Psi = \Phi(\vec{r}_1, \vec{r}_2) \times \xi(\sigma_1, \sigma_2) \times \zeta(C_1, C_2)$

чётная  
( $L=0$ )

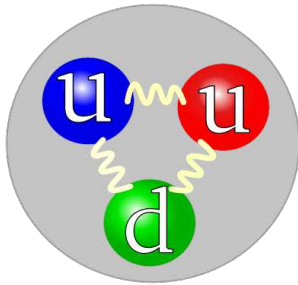
ЧЁТНАЯ,  
т.е.  $S=1$

нечётная  
(разные «цвета»,  
меняется при  
перестановке)



# Цветовой заряд и магнитные моменты протона и нейтрона

протон



чётная  
( $L=0$ )

Полный спин u-кварков ( $q>0$ )  $S_u=1$

Спин d-кварка ( $q<0$ )  $S_d=1/2$

Спин протона  $J=1/2$

$$\hat{\vec{J}} = \hat{\vec{S}}_u + \hat{\vec{S}}_d$$

$$\hat{\vec{M}} = 4\mu_{\text{яд}} \hat{\vec{S}}_u - 2\mu_{\text{яд}} \hat{\vec{S}}_d$$

перестановке)

ЧЁТНАЯ,  
т.е.  $S=1$

# Цветовой заряд и магнитные моменты протона и нейтрона

аналогично вычислениям для g-фактора...

$$\hat{\vec{J}} = \hat{\vec{S}}_u + \hat{\vec{S}}_d$$

$$\hat{\vec{M}} = 4\mu_{\text{яд}} \hat{\vec{S}}_u - 2\mu_{\text{яд}} \hat{\vec{S}}_d$$

$$\hat{M}_Z = G\mu_{\text{яд}} \hat{J}_Z = 4\mu_{\text{яд}} \hat{J}_Z - 6\mu_{\text{яд}} \langle \hat{S}_{d,Z} \rangle$$

$$) S_u = 1$$
$$/2$$

ановке)

# Цветовой заряд и магнитные моменты протона и нейтрона

аналогично вычислениям для g-фактора...

$$\hat{\vec{J}} = \hat{\vec{S}}_u + \hat{\vec{S}}_d$$

$$\hat{\vec{M}} = 4\mu_{\text{яд}} \hat{\vec{S}}_u - 2\mu_{\text{яд}} \hat{\vec{S}}_d$$

$$\hat{M}_Z = G\mu_{\text{яд}} \hat{J}_Z = 4\mu_{\text{яд}} \hat{J}_Z - 6\mu_{\text{яд}} \langle \hat{S}_{d,Z} \rangle$$

$$\langle \hat{\vec{S}}_d \rangle = A \vec{J}$$

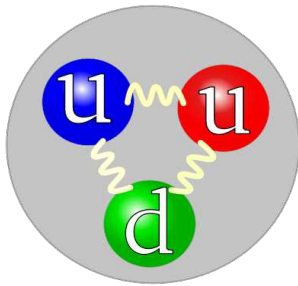
$$AJ(J+1) = \langle \hat{\vec{S}}_d \hat{\vec{J}} \rangle = \frac{1}{2} (J(J+1) + S_d(S_d+1) - S_u(S_u+1))$$

$$G = 1 + 3 \frac{S_u(S_u+1) - S_d(S_d+1)}{J(J+1)}$$

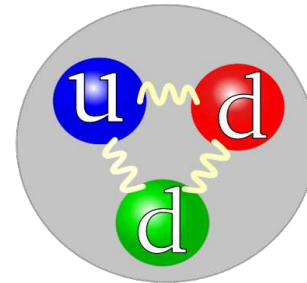
$$) S_u = 1/2$$

ановке)

# Цветовой заряд и магнитные моменты протона и нейтрона



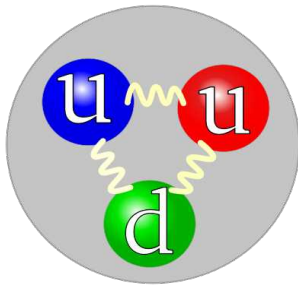
протон



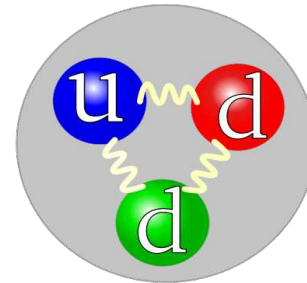
нейтрон

$$G = 1 + 3 \frac{S_u(S_u + 1) - S_d(S_d + 1)}{J(J + 1)}$$

# Цветовой заряд и магнитные моменты протона и нейтрона



протон

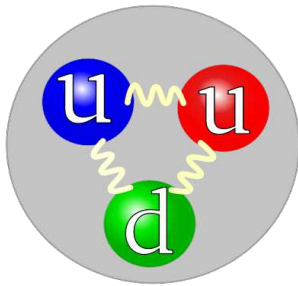


нейтрон

$$G = 1 + 3 \frac{S_u(S_u + 1) - S_d(S_d + 1)}{J(J + 1)}$$

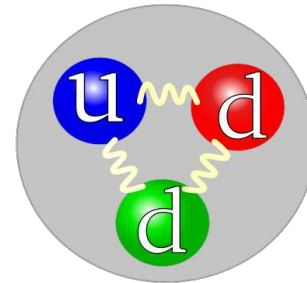
$$\begin{aligned} G_{\text{quark}}^{\text{naive}} &= 6 \\ G_{\text{exp}} &= 5.586 \end{aligned}$$

# Цветовой заряд и магнитные моменты протона и нейтрона



протон

$$G_{\text{quark}}^{\text{naive}} = 6$$
$$G_{\text{exp}} = 5.586$$

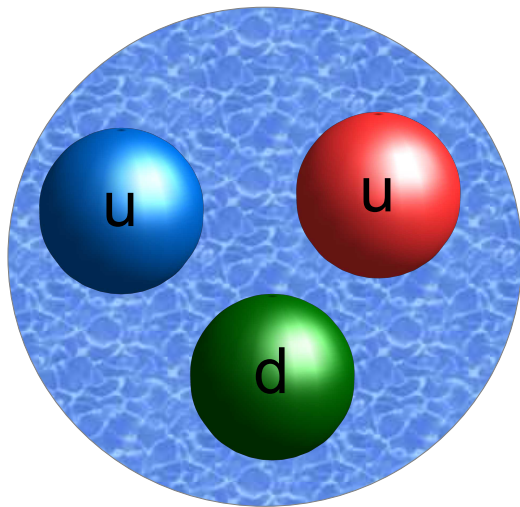


нейтрон

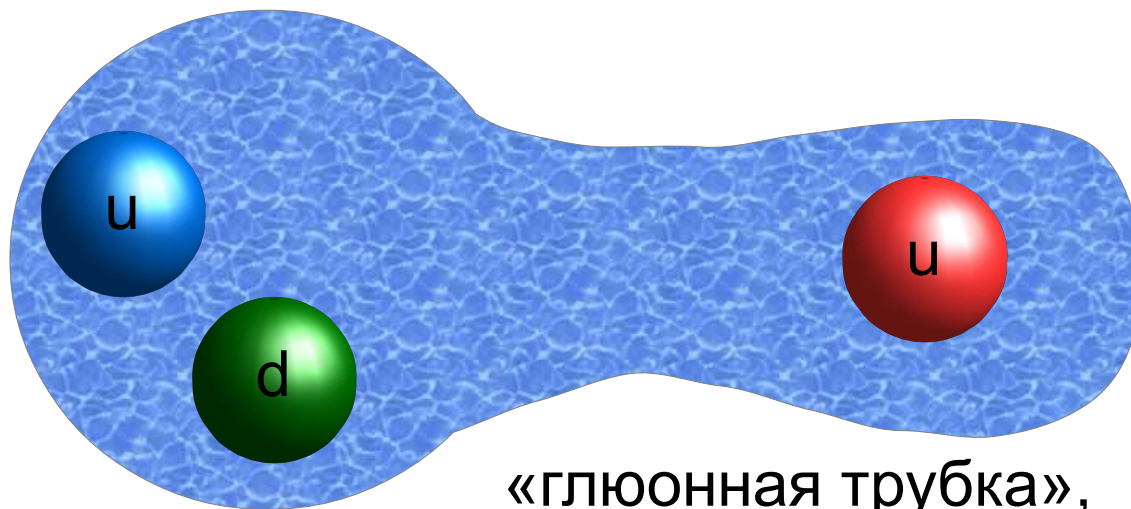
$$G_{\text{quark}}^{\text{naive}} = -4$$
$$G_{\text{exp}} = -3.826$$

$$G = 1 + 3 \frac{S_u(S_u + 1) - S_d(S_d + 1)}{J(J + 1)}$$

# Конфайнмент и асимптотическая свобода



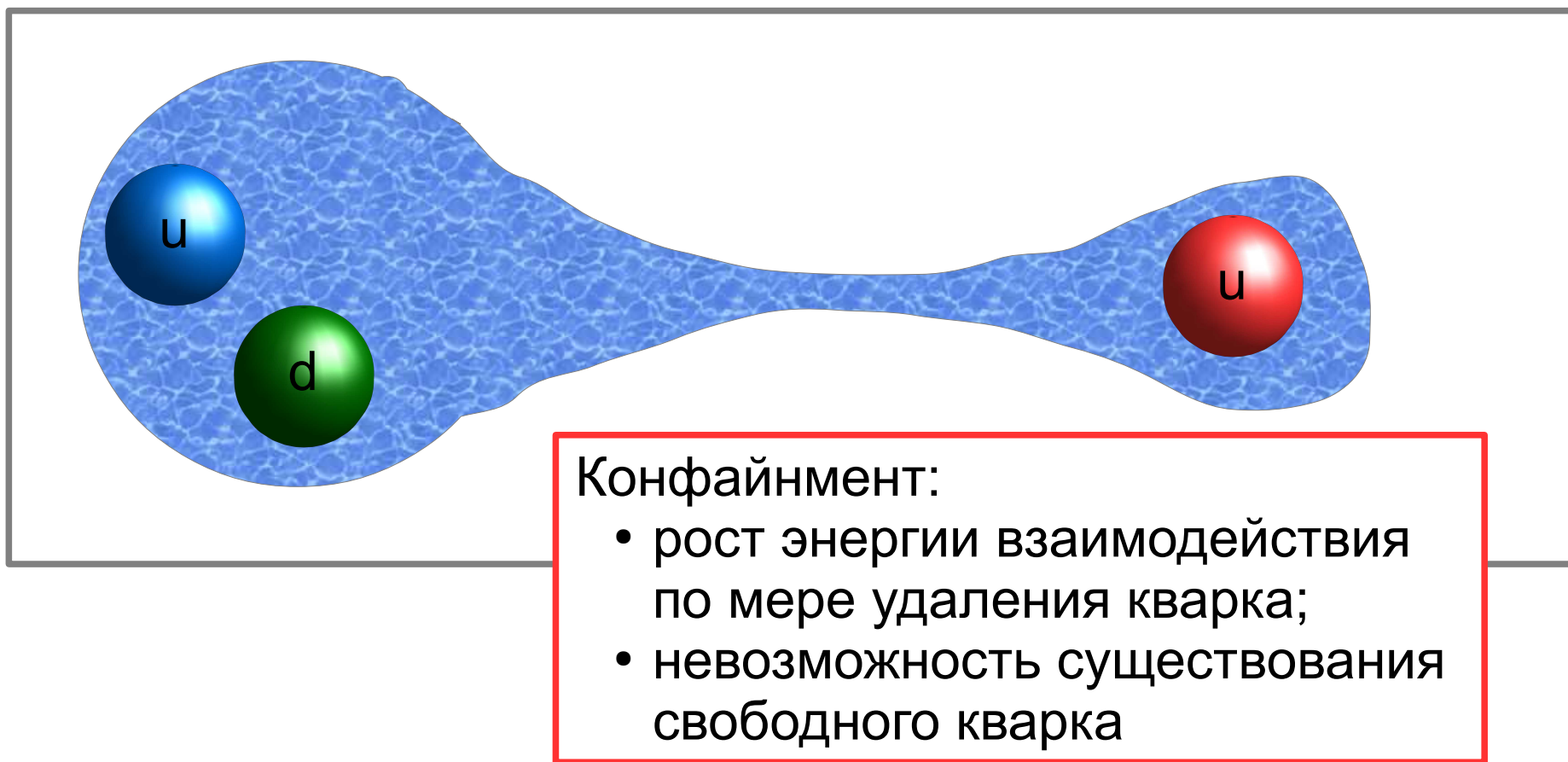
# Конфайнмент и асимптотическая свобода



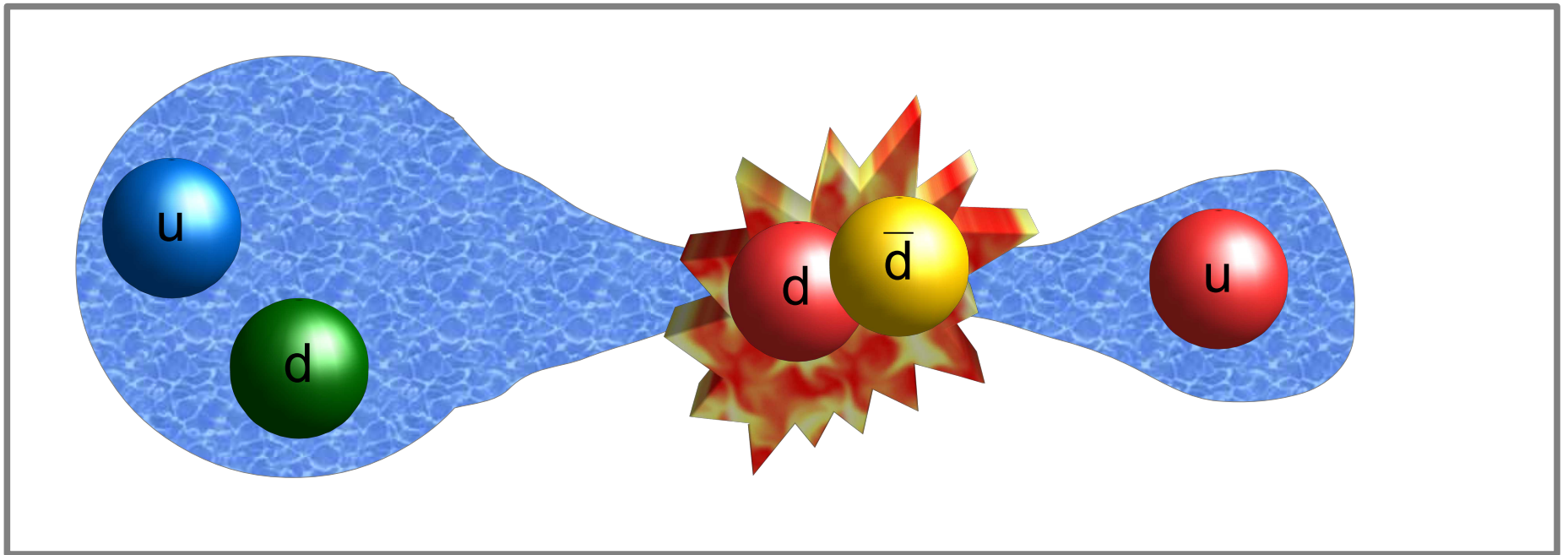
«глюонная трубка»,  
энергетически невыгодна



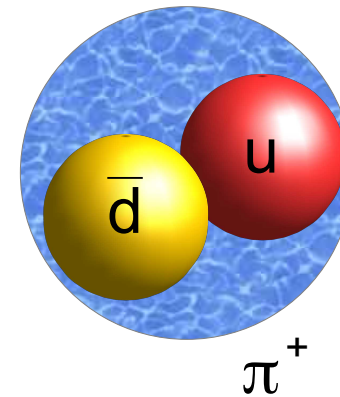
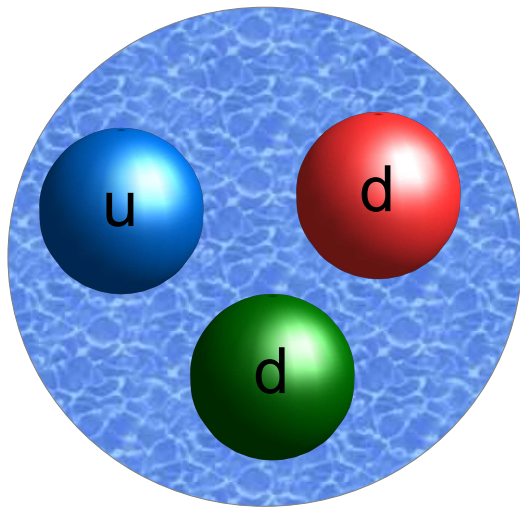
# Конфайнмент и асимптотическая свобода



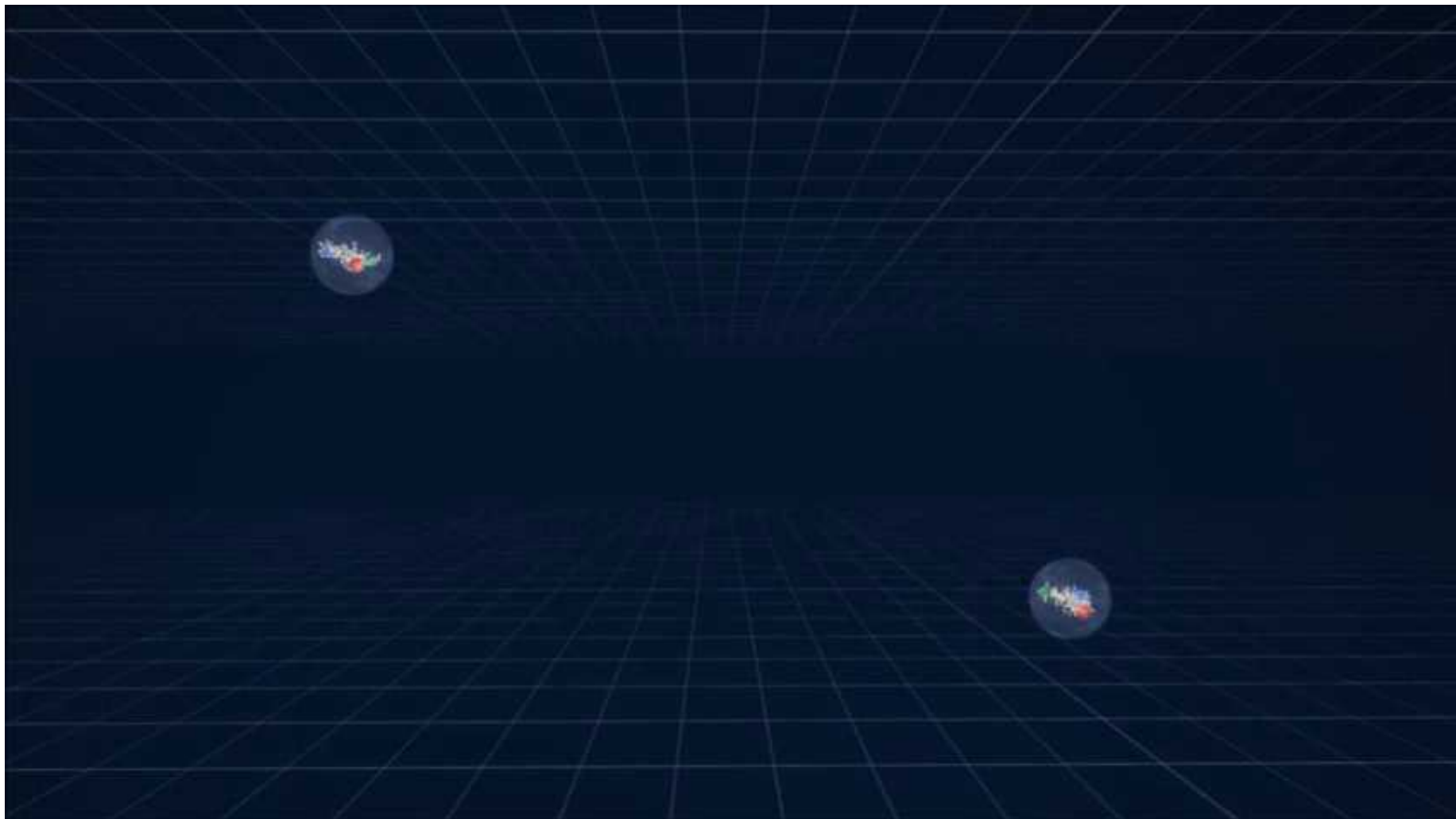
# Конфайнмент и асимптотическая свобода



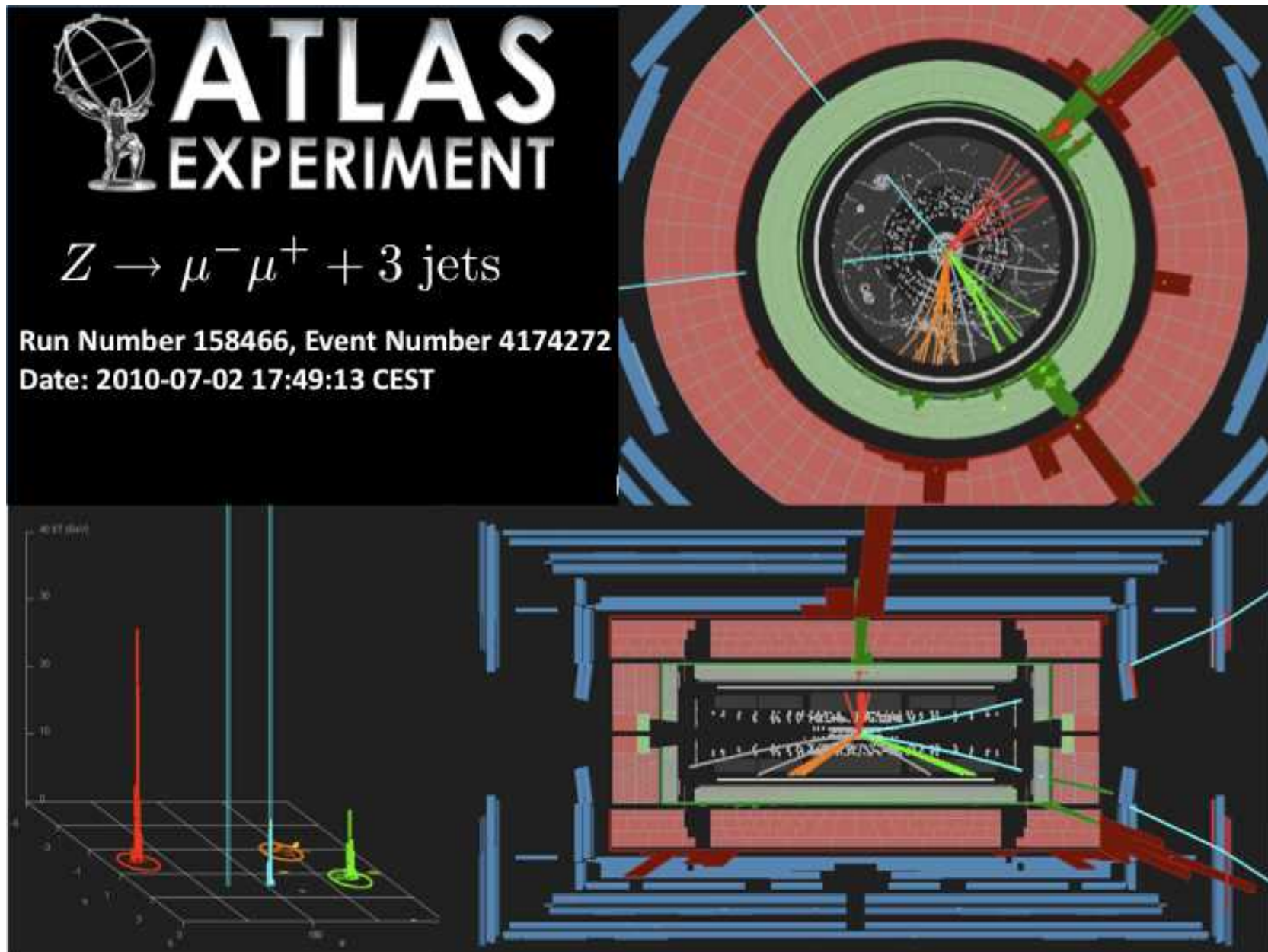
# Конфайнмент и асимптотическая свобода



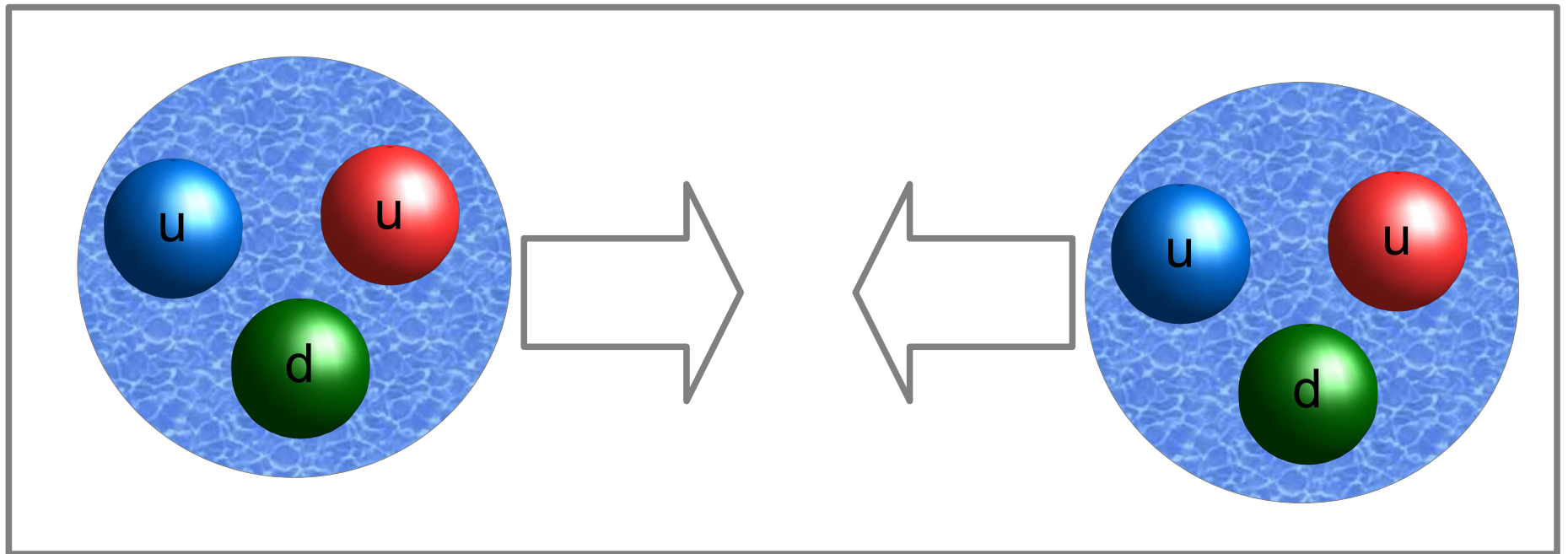
# Эксперимент: адронные струи



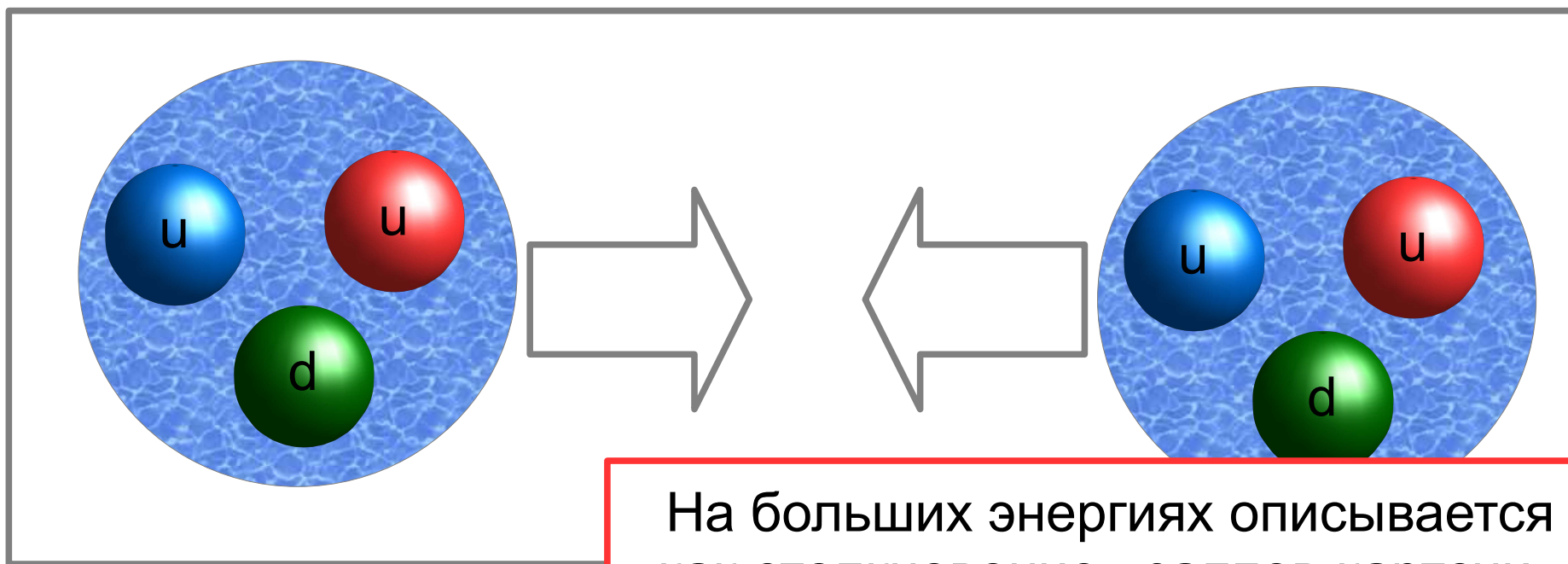
# Эксперимент: адронные струи



# Конфайнмент и асимптотическая свобода



# Конфайнмент и асимптотическая свобода



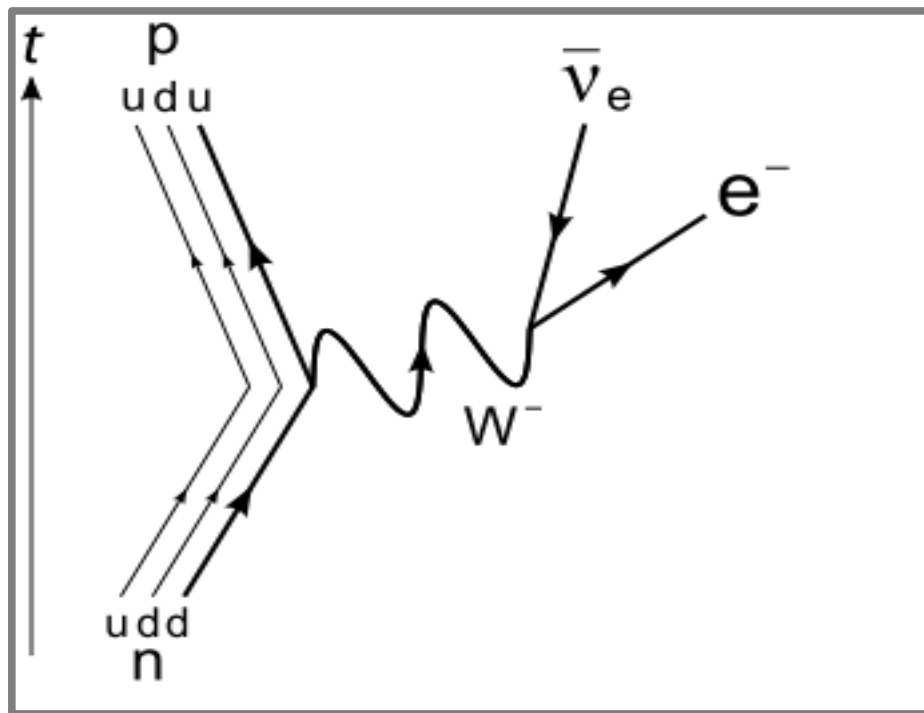
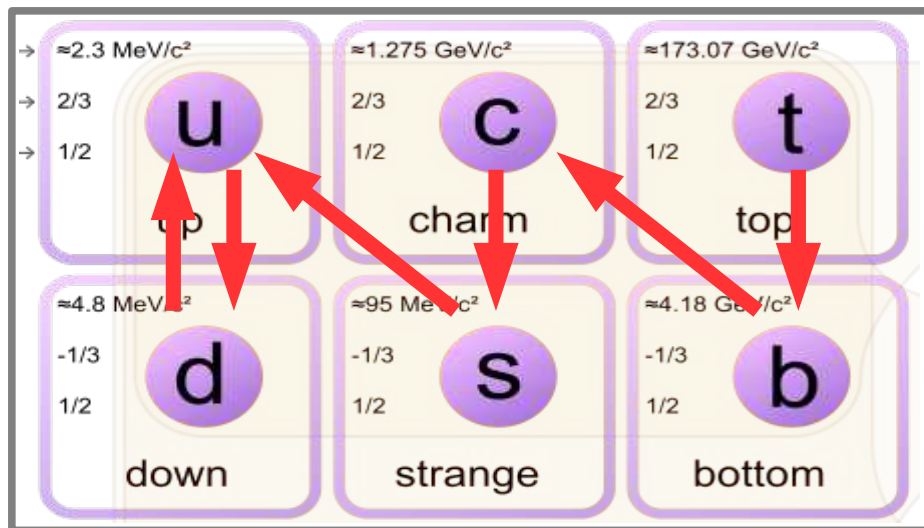
На больших энергиях описывается  
как столкновение «залпов картечи»  
из свободных кварков

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{E} \ll R_{\text{яд}}$$

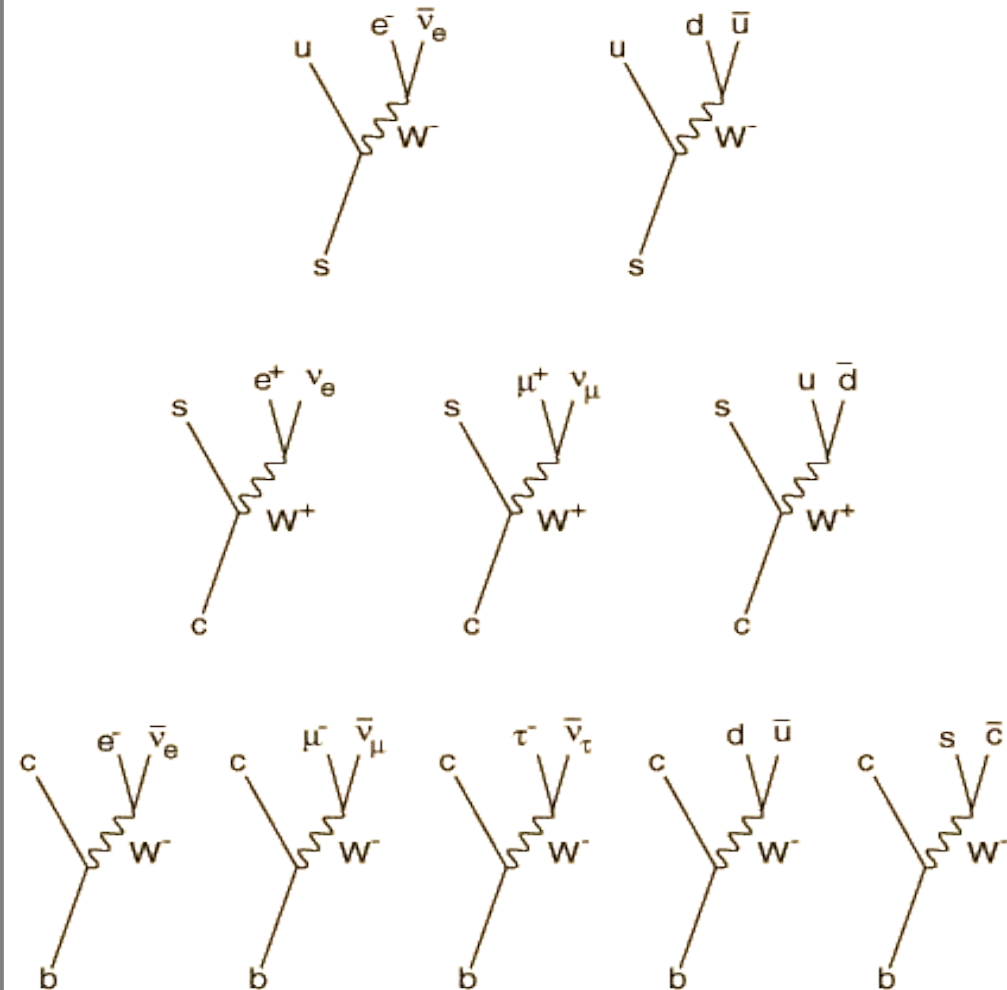
$$E \gg \frac{hc}{R_{\text{яд}}} \simeq 10^{-10} \text{ Дж} \simeq 1 \text{ ГэВ}$$



# Превращения кварков (слабое взаимодействие)



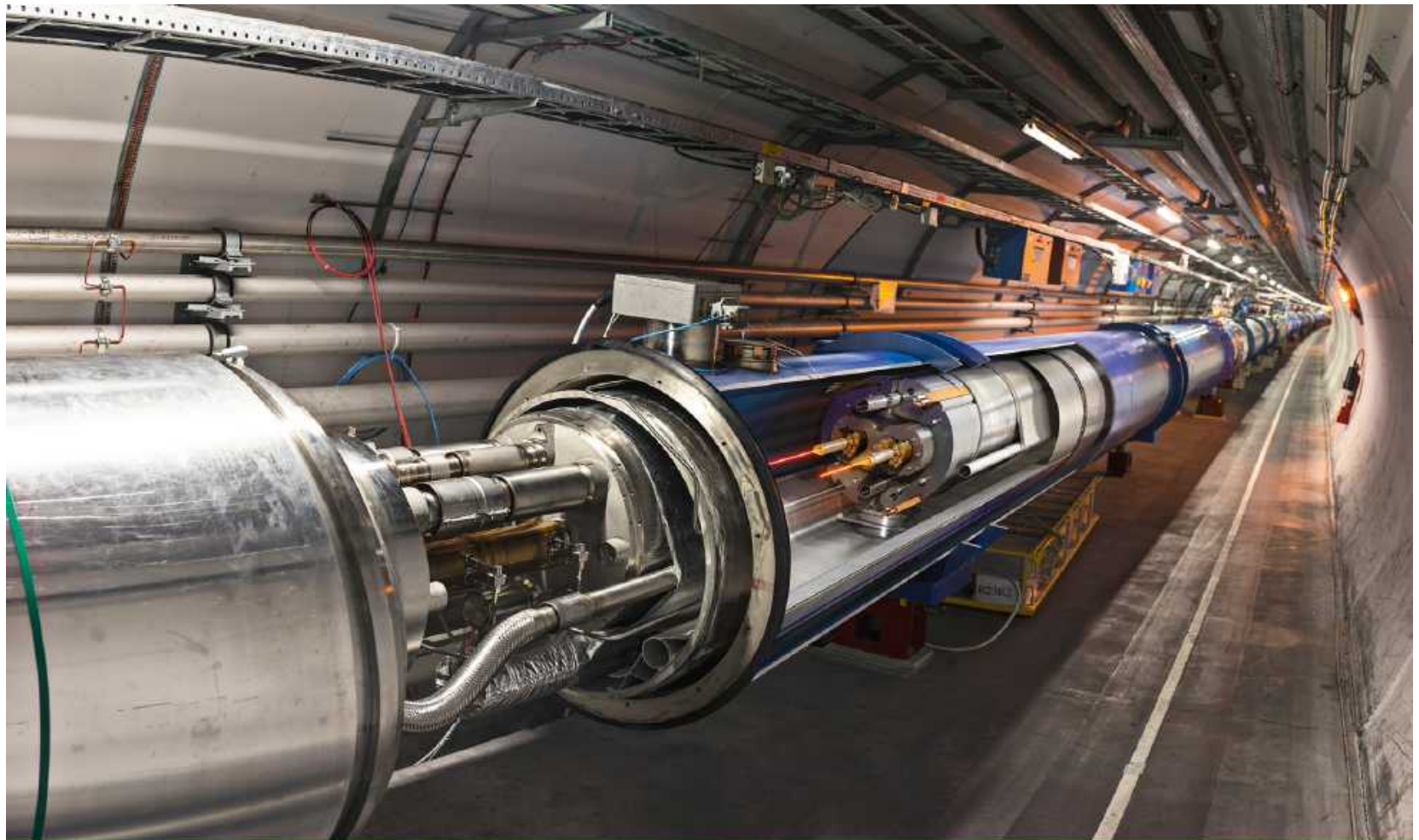
Feynman diagrams of quark decay by weak interaction



см. также стр. 333 задачника



## Часть 2. «Инструменты» физики частиц: сечения и пороги реакций.



CERN Brochure, 2017

# Сечение реакции: неподвижная мишень

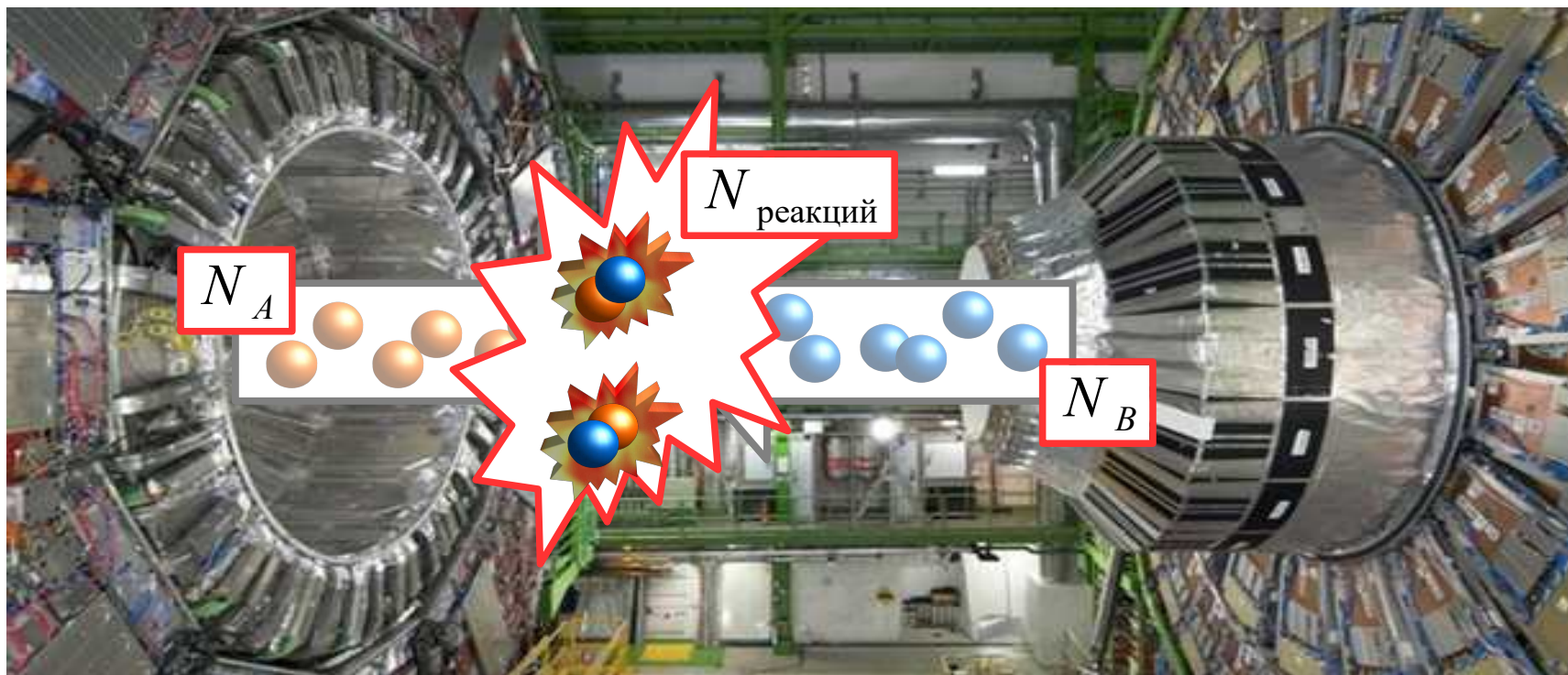


ПОТОК частиц  $j$ ,  
 $1/(\text{см}^2 \text{ с})$

реакций в  
секунду,  
 $dN/dt$

$$\frac{dN}{dt} = j(nS dx) \sigma$$

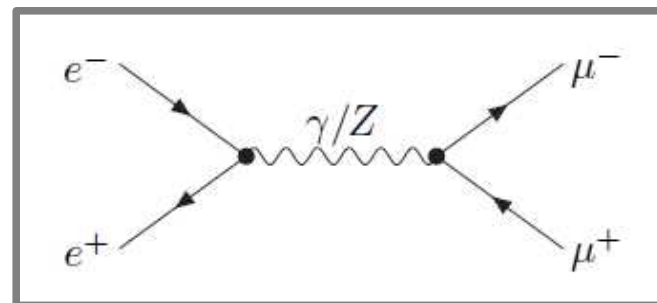
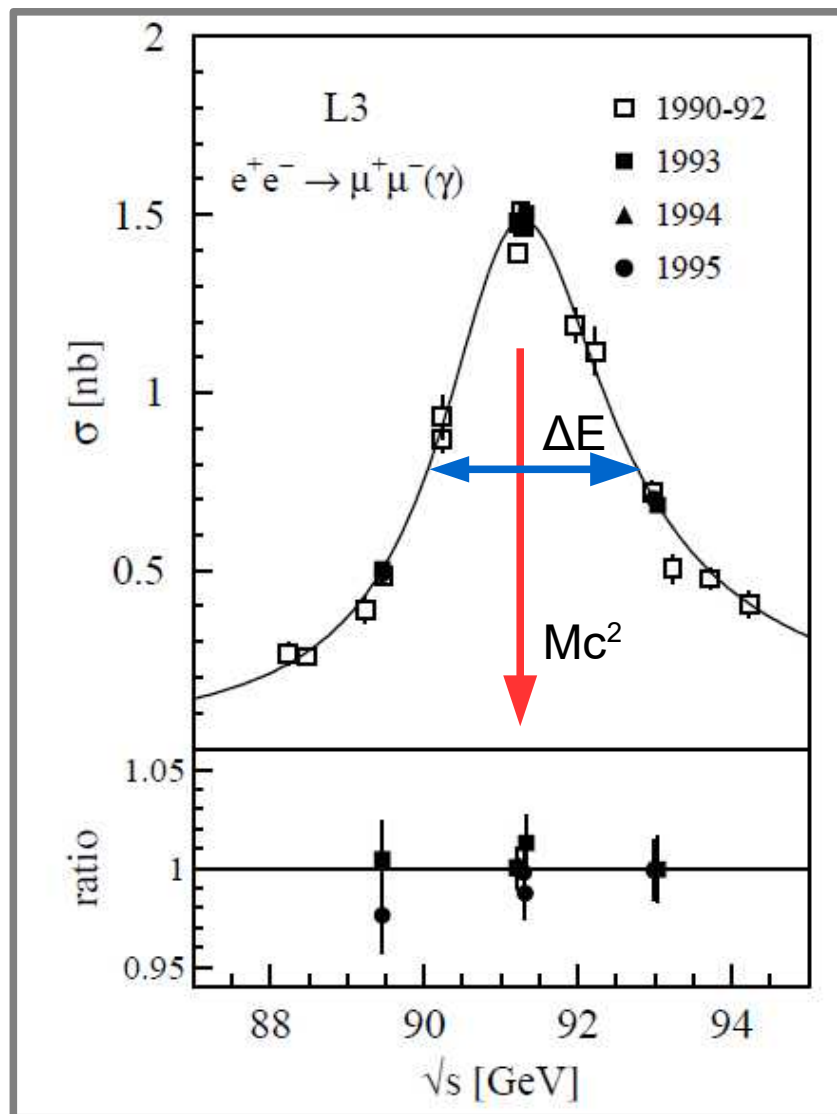
# Сечение реакции: встречные пучки



$$N_{\text{реакций}}^{(i)} = \frac{N_A \times N_B}{A} \sigma^{(i)}$$



# Сечение реакции – фактически измеряемая величина в эксперименте



Образование промежуточной  
частицы = “резонанс” сечения  
рассеяния

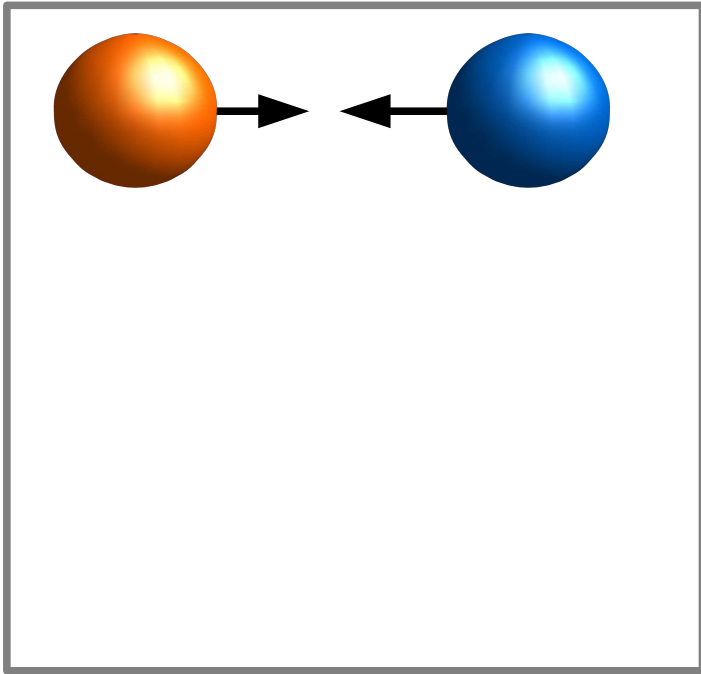
Ширина этого резонанса  
обратно пропорциональна  
времени жизни частицы

INTRODUCTION TO COLLIDER PHYSICS

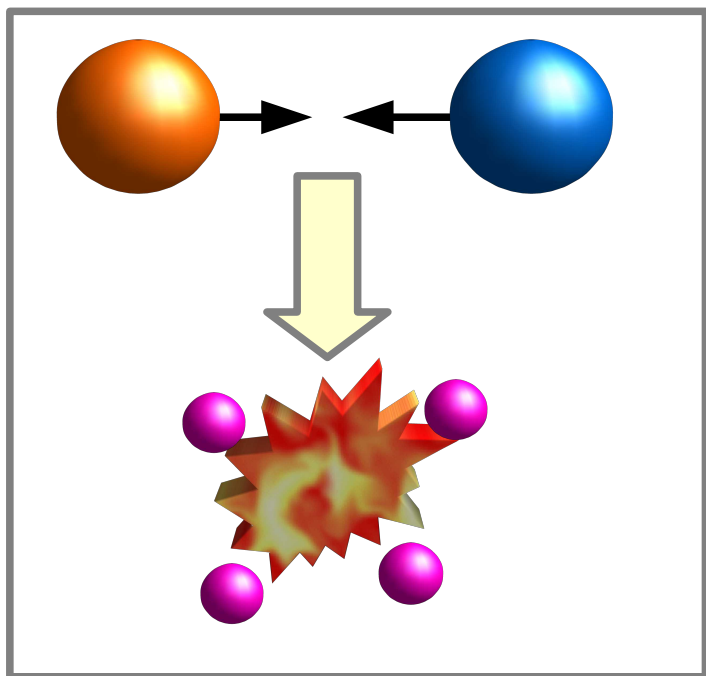
MAXIM PERELSTEIN\*

<https://arxiv.org/pdf/1002.0274.pdf>

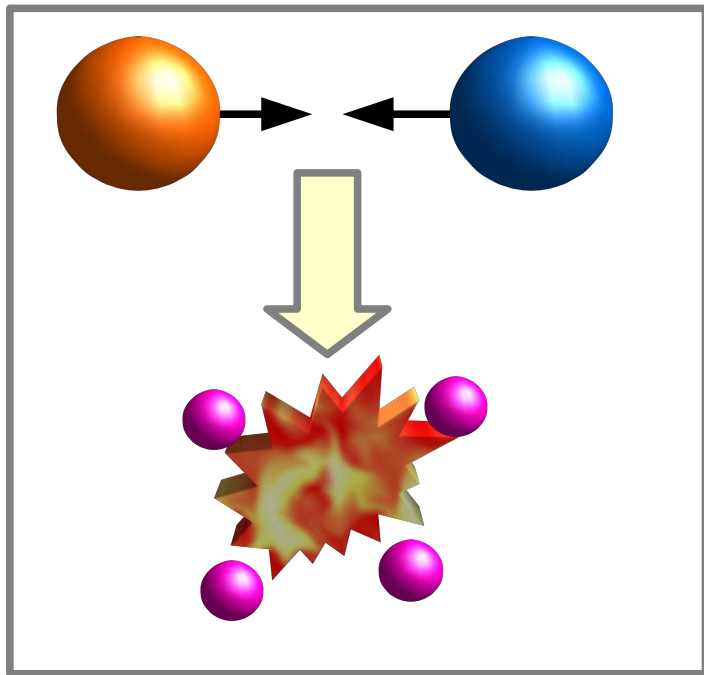
# Порог реакции (система Ц.М.=встречные пучки)



# Порог реакции (система Ц.М.=встречные пучки)

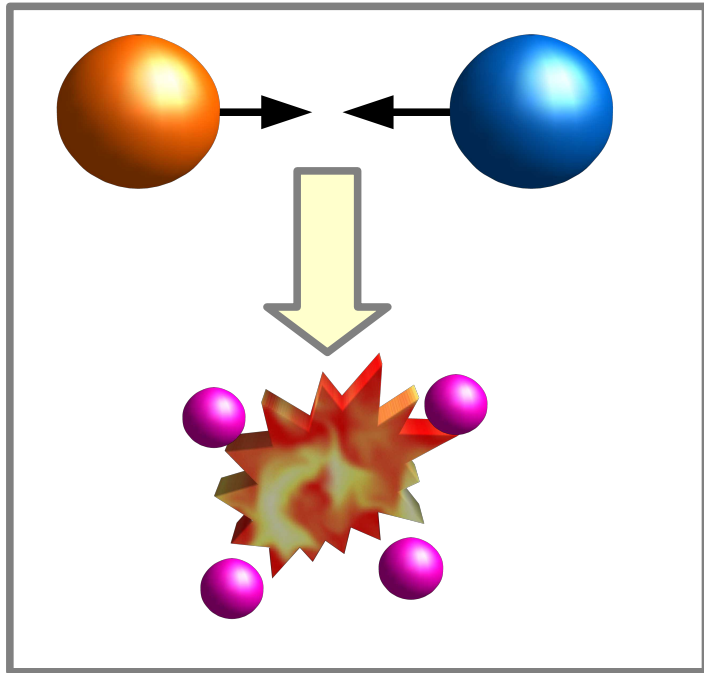


# Порог реакции (система Ц.М.=встречные пучки)



Минимальная энергия – если в системе центра масс продукты реакции покоятся

# Порог реакции (система Ц.М.=встречные пучки)

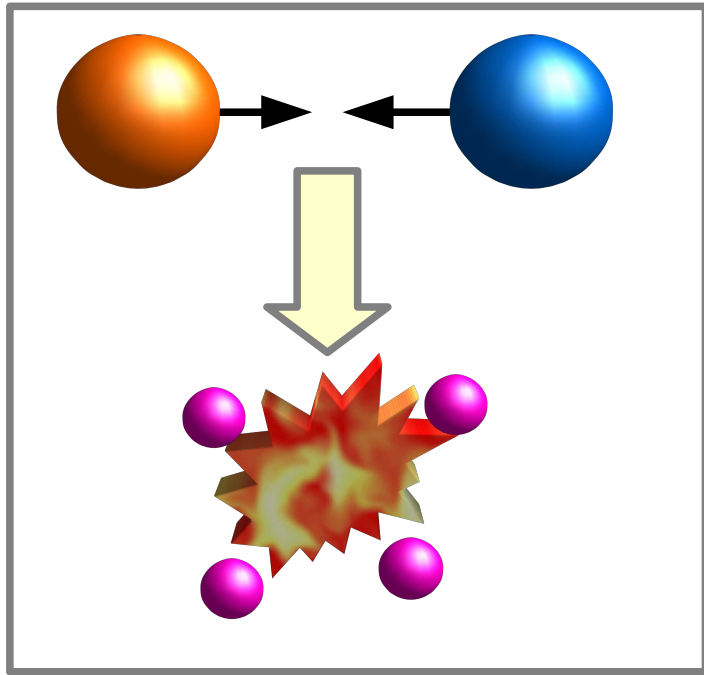


Минимальная энергия – если в системе центра масс продукты реакции покоятся

$$\begin{pmatrix} mc^2 + T \\ pc \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} mc^2 + T \\ -pc \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Mc^2 \\ 0 \end{pmatrix}$$
$$2(mc^2 + T) = M c^2$$



# Порог реакции (система Ц.М.=встречные пучки)

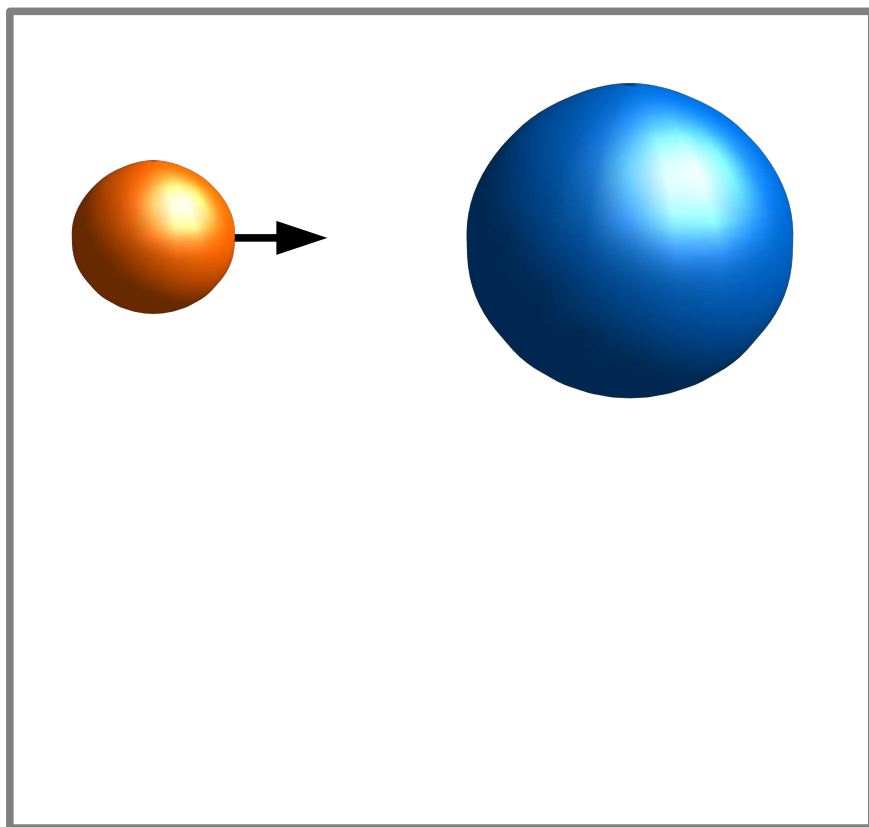


Минимальная энергия – если в системе центра масс продукты реакции покоятся

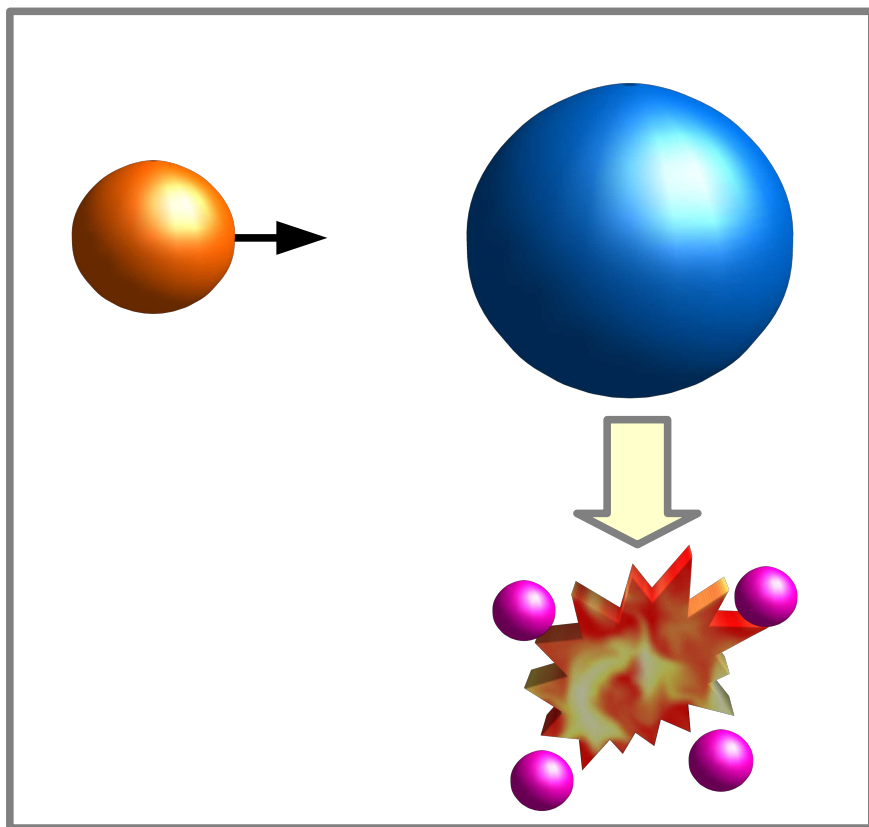
$$\begin{pmatrix} mc^2 + T \\ pc \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} mc^2 + T \\ -pc \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Mc^2 \\ 0 \end{pmatrix}$$
$$2(mc^2 + T) = Mc^2$$

$$T = \frac{Mc^2}{2} - mc^2$$

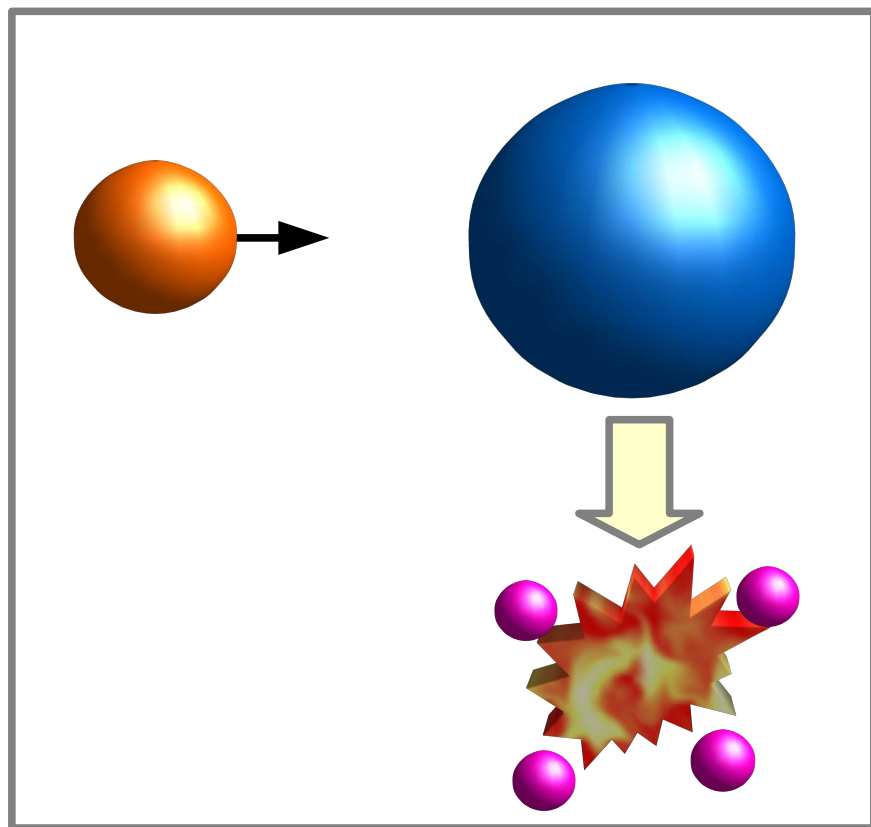
# Порог реакции (лаб.с.к.=неподвижная мишень)



# Порог реакции (лаб.с.к.=неподвижная мишень)

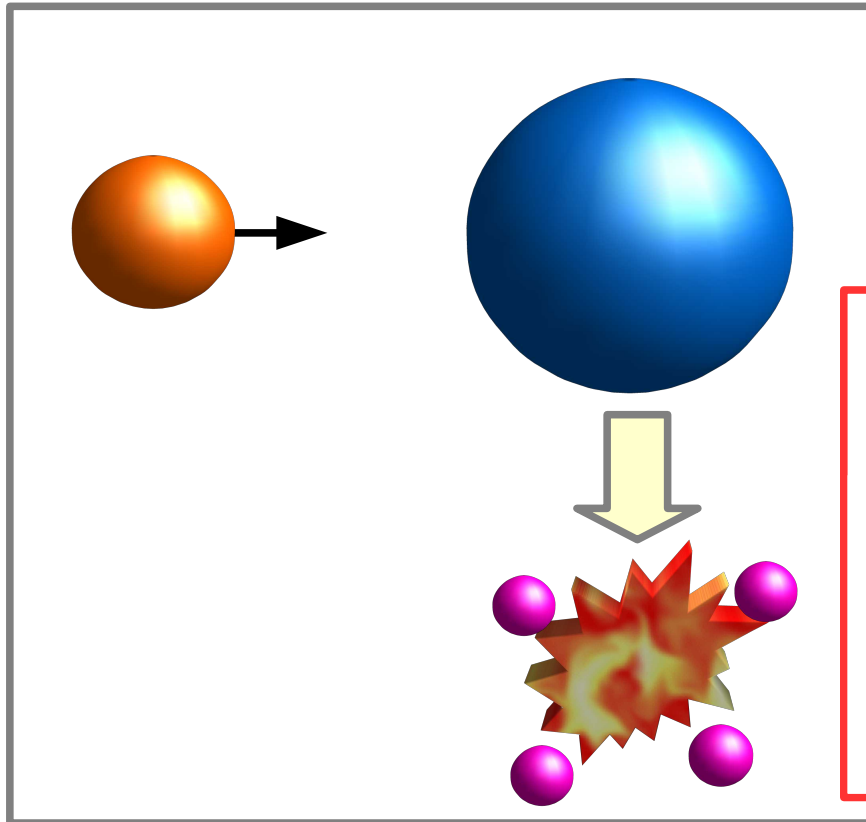


# Порог реакции (лаб.с.к.=неподвижная мишень)



Минимальная энергия – если в лабораторной с.к. продукты реакции движутся как целое

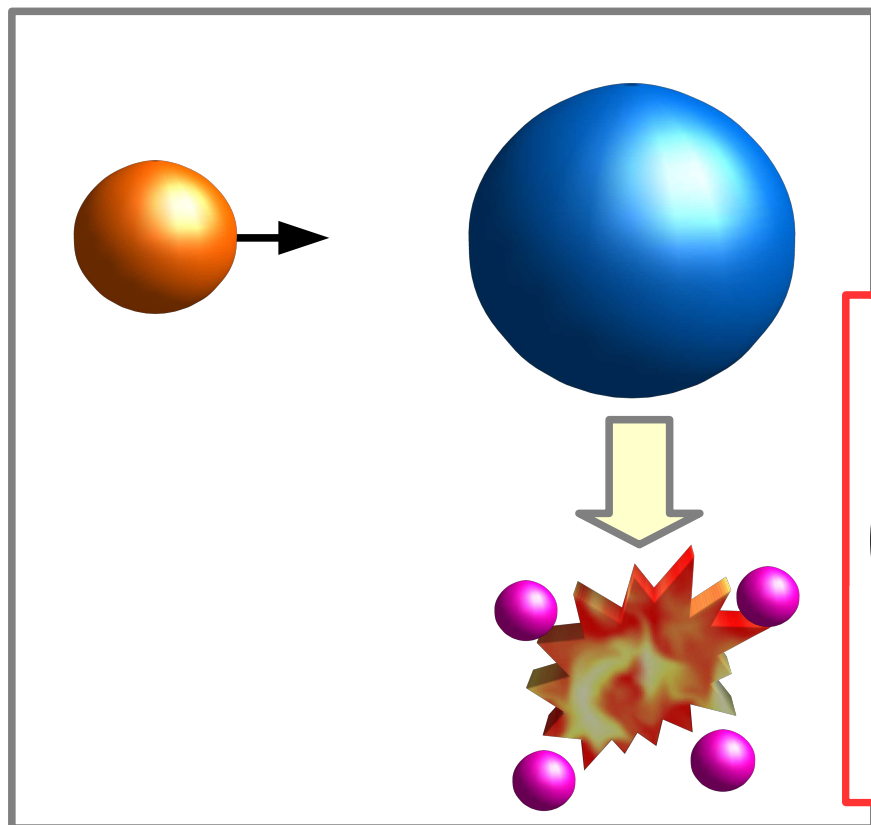
# Порог реакции (лаб.с.к.=неподвижная мишень)



Минимальная энергия – если в лабораторной с.к. продукты реакции движутся как целое

$$\begin{pmatrix} m_1 c^2 + T \\ pc \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m_2 c^2 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M c^2 + T' \\ pc \end{pmatrix}$$

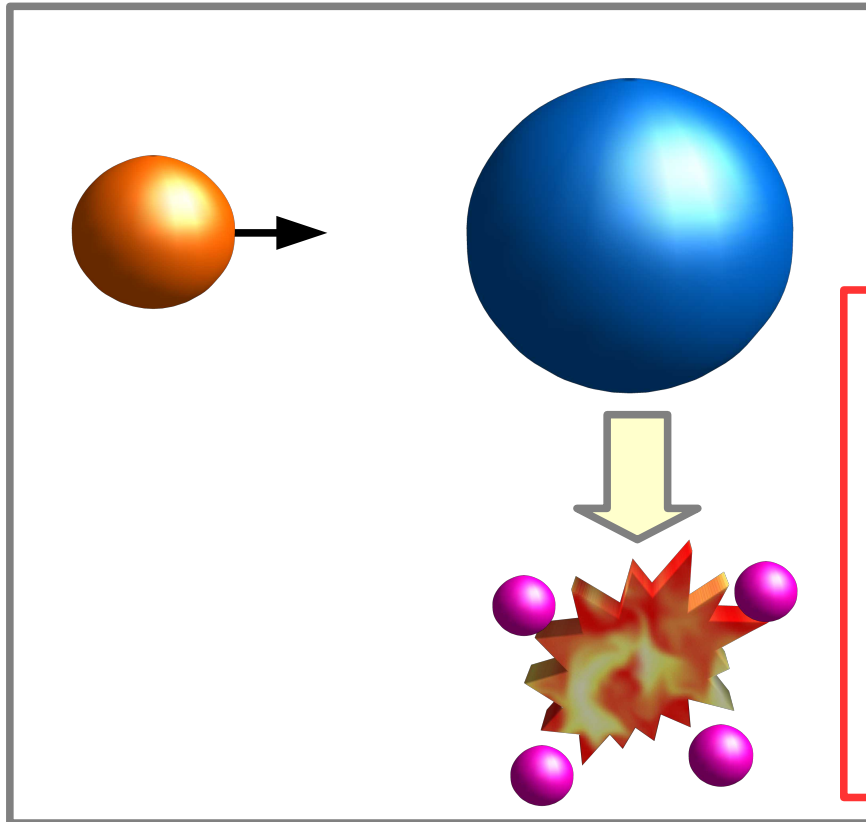
# Порог реакции (лаб.с.к.=неподвижная мишень)



Минимальная энергия – если в лабораторной с.к. продукты реакции движутся как целое

$$\begin{pmatrix} m_1 c^2 + T \\ pc \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m_2 c^2 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M c^2 + T' \\ pc \end{pmatrix}$$
$$(m_1 c^2)^2 + (m_2 c^2)^2 + 2(m_1 c^2 + T)m_2 c^2 = (M c^2)^2$$

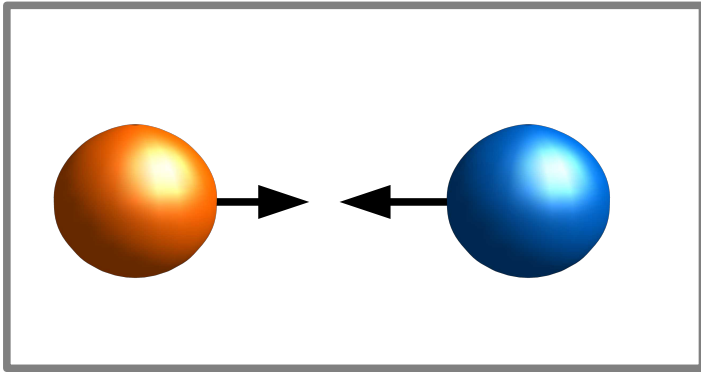
# Порог реакции (лаб.с.к.=неподвижная мишень)



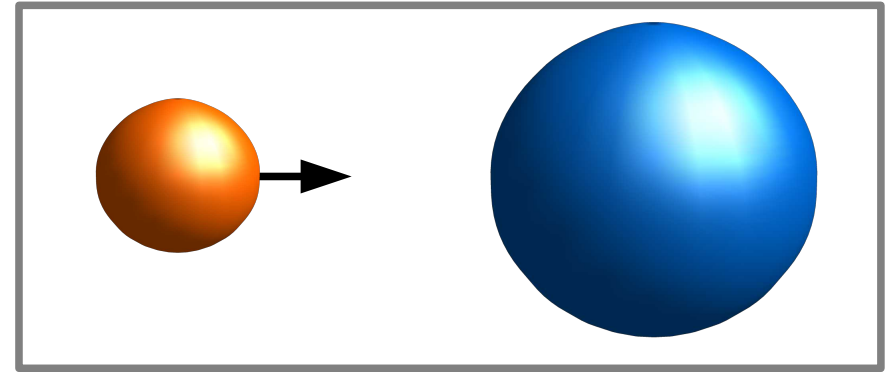
Минимальная энергия – если в лабораторной с.к. продукты реакции движутся как целое

$$\begin{pmatrix} m_1 c^2 + T \\ pc \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m_2 c^2 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M c^2 + T' \\ pc \end{pmatrix}$$
$$(m_1 c^2)^2 + (m_2 c^2)^2 + 2(m_1 c^2 + T)m_2 c^2 = (M c^2)^2$$
$$T = \frac{(M c^2)^2 - (m_1 c^2)^2 - (m_2 c^2)^2}{2 m_2 c^2} - m_1 c^2$$

# Сравнение порогов реакции



$$T_{\text{встр}} = \frac{M c^2}{2} - m c^2$$



$$T_{\text{пок}} = \frac{(M c^2)^2 - (m_1 c^2)^2 - (m_2 c^2)^2}{2 m_2 c^2} - m_1 c^2$$

для  $m_1 = m_2$

$$\frac{T_{\text{пок}}}{T_{\text{встр}}} = \frac{M^2 - 4 m^2}{m(M - 2 m)} = \frac{M}{m} + 2 > 1$$



# Часть 3. «Инструменты» физики частиц: ускорители и детекторы.

# Немного про ускорители

В основном —  
встречные пучки

Главные  
характеристики:

- тип ускоряемых частиц
- энергия частиц
- светимость (число потенциально возможных столкновений в единицу времени)

| Name     | Type       | $\sqrt{s}$ (GeV)<br>в системе ц.м. | Years of<br>operation                |
|----------|------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| LEP      | $e^+e^-$   | 91.2 (LEP-1)<br>130-209 (LEP-2)    | 1989-95 (LEP-1)<br>1996-2000 (LEP-2) |
| SLC      | $e^+e^-$   | 91.2                               | 1992-98                              |
| HERA     | $e^\pm p$  | 320                                | 1992-2007                            |
| Tevatron | $p\bar{p}$ | 1800 (Run-I)<br>1960 (Run-II)      | 1987-96 (Run-I)<br>2000-??? (Run-II) |
| LHC      | $pp$       | 14000                              | 2010? - 2013?<br>2013?? - 2016???    |
| ILC      | $e^+e^-$   | 500-1000                           | ???                                  |

INTRODUCTION TO COLLIDER PHYSICS

MAXIM PERELSTEIN\*

# SLAC (1966-...),



Вид с воздуха на комплекс зданий Стэнфордского линейного ускорителя. Детекторный комплекс справа. Сам канал ускорителя находится на глубине 10 метров под землёй. [http://en.wikipedia.org/wiki/Stanford\\_Linear\\_Accelerator\\_Center](http://en.wikipedia.org/wiki/Stanford_Linear_Accelerator_Center)

- до 2017 года – самое длинное прямое здание (2 мили)
- Нобелевские премии: с-кварк (1976), кварковая структура протона и нейтрона (1990), тау-лептон (1995)
- 50 ГэВ энергия пучка, до 90 ГэВ в с.ц.м. в режиме коллайдера (1987-1998)

# Циклотрон

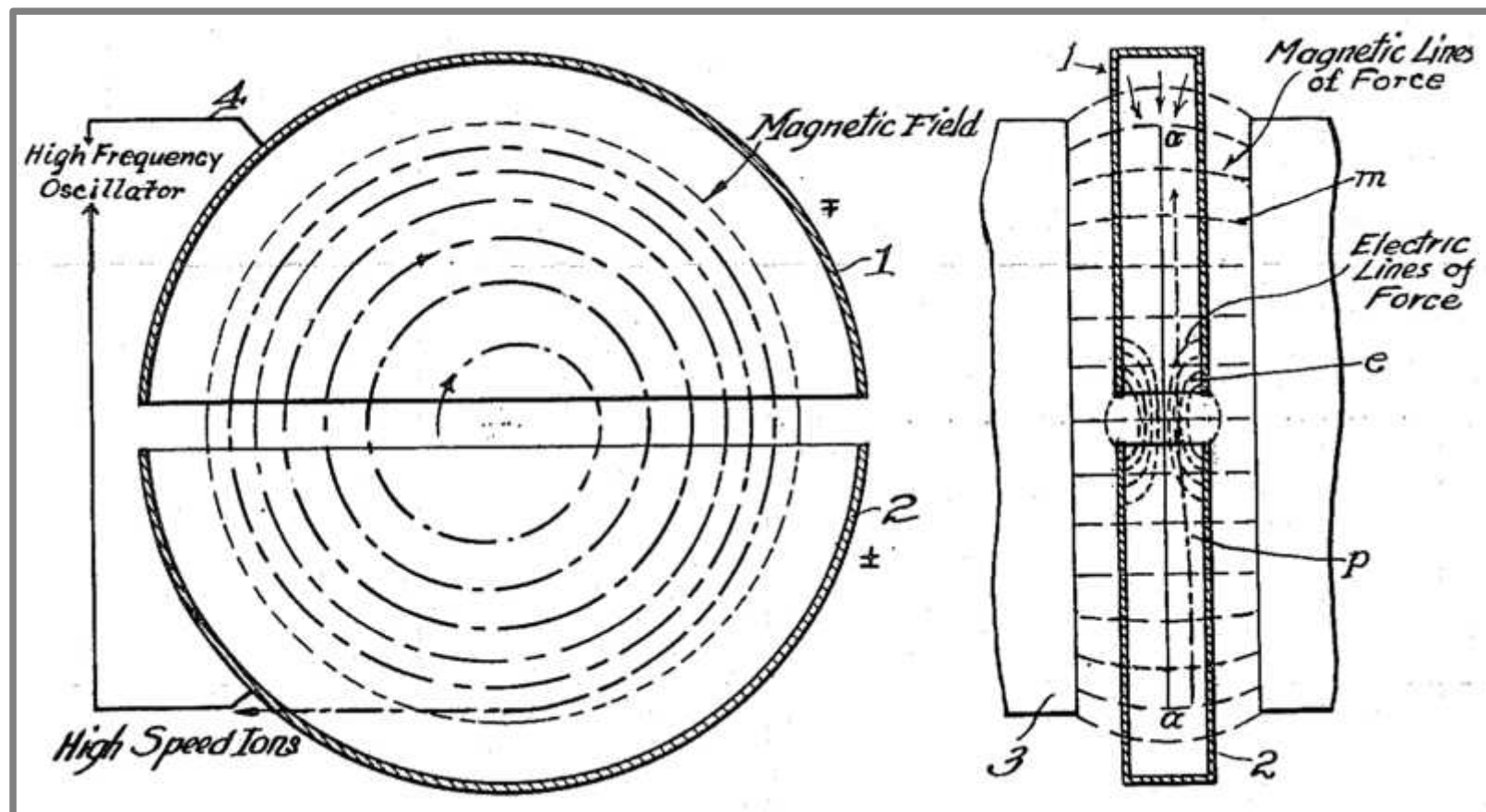


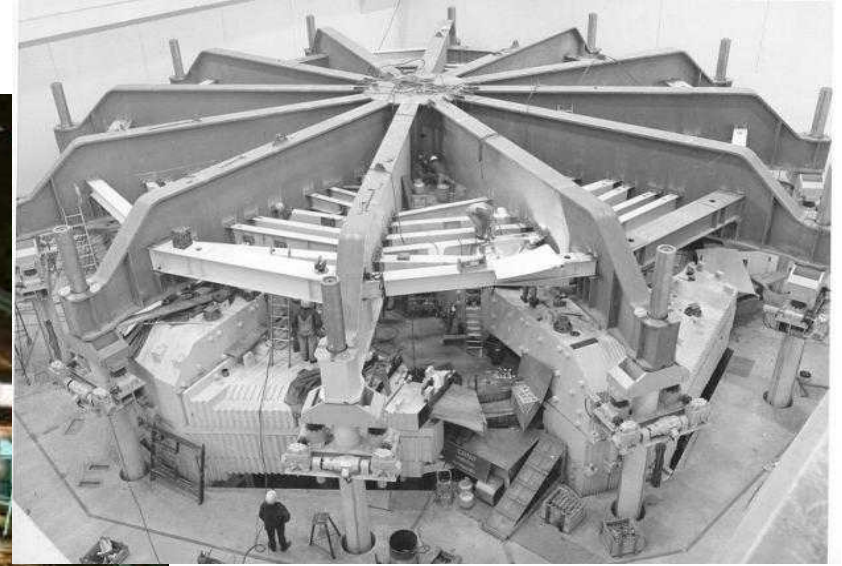
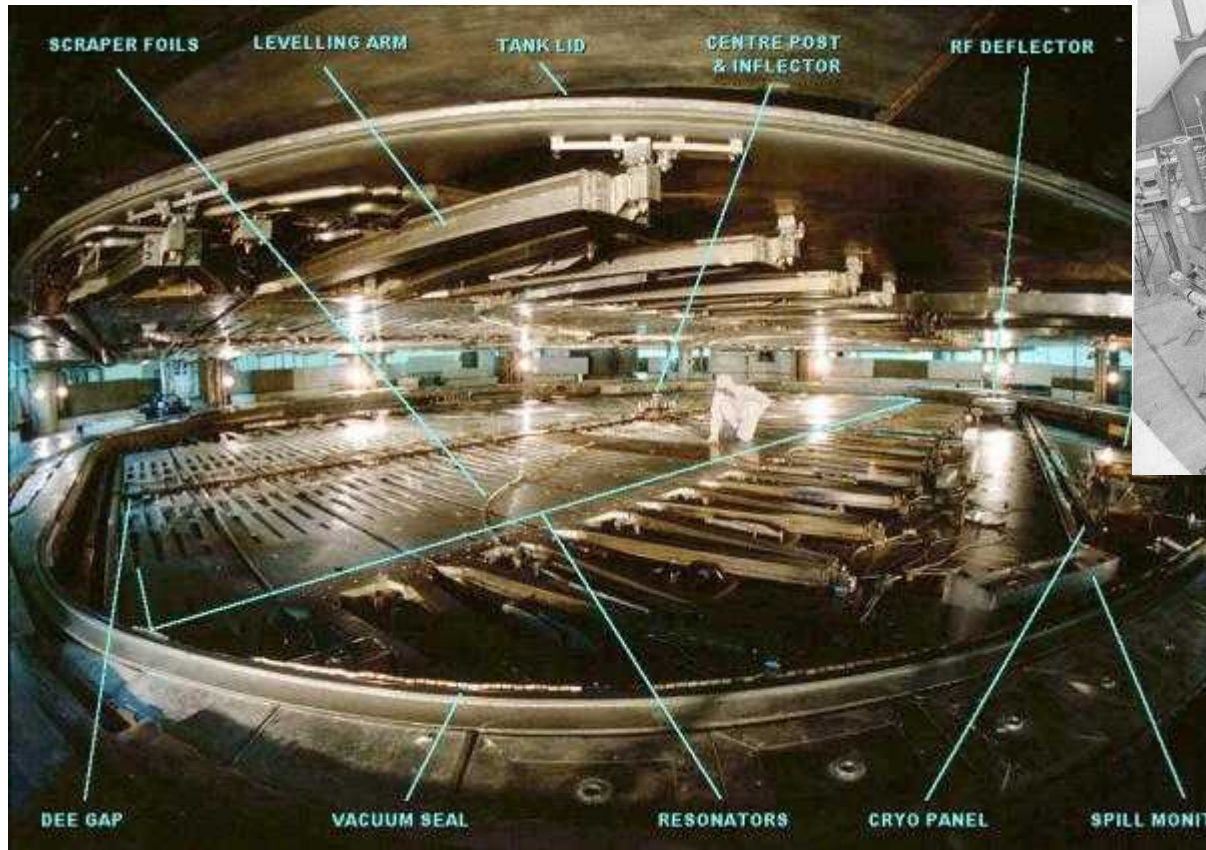
Схема циклотрона из патентной заявки Лоуренса, 1934 год.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{V}{2\pi R} = \frac{V}{2\pi \frac{mV}{qB}} = \frac{qB}{2\pi m}$$

для нерелятивистской  
частицы не зависит от  
скорости!!!



# TRIUMF

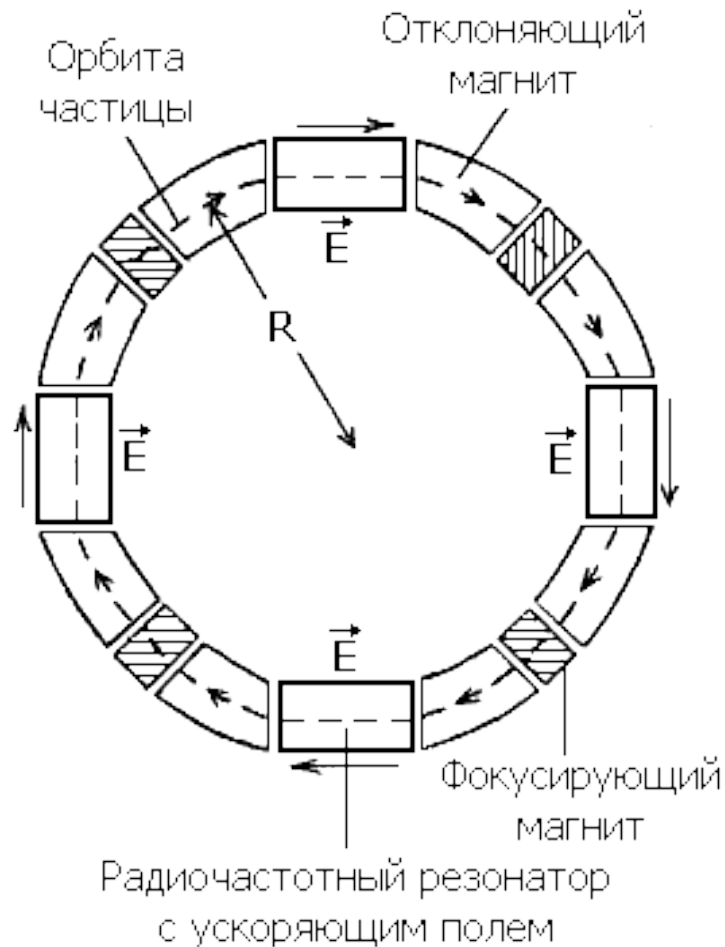


Самый большой  
циклотрон

Протоны с  $T=520$  МэВ

Диаметр 18 метров,  
поле в зазоре 0.46 Тл

# Синхротроны



- Фиксированная траектория
- Магнитное поле и частота/фаза ускоряющего поля подстраиваются
- Принципиально работает импульсами (bunch)
- Частицы и античастицы можно разогнать одновременно в противоположных направлениях

# Синхротроны



- Фиксированная траектория
- Магнитное поле и частота/фаза ускоряющего поля подстраиваются
- Принципиально работает импульсами (bunch)
- Частицы и античастицы можно

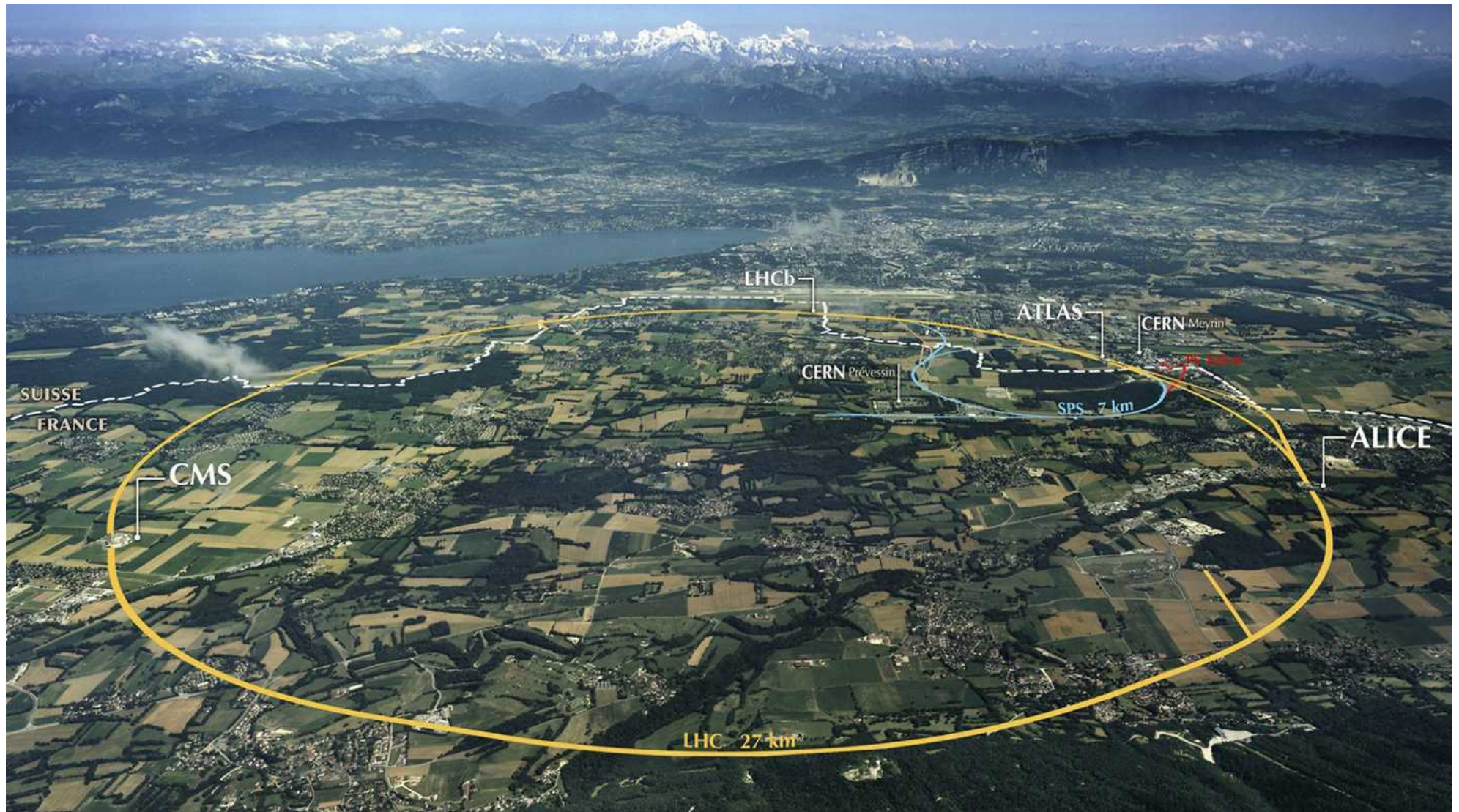
нно в

Одно из ограничений по энергии:  
синхротронное излучение (100-200  
ГэВ для электронов)

$$P \propto \frac{1}{R^2} \left( \frac{E}{mc^2} \right)^2$$



# БАК



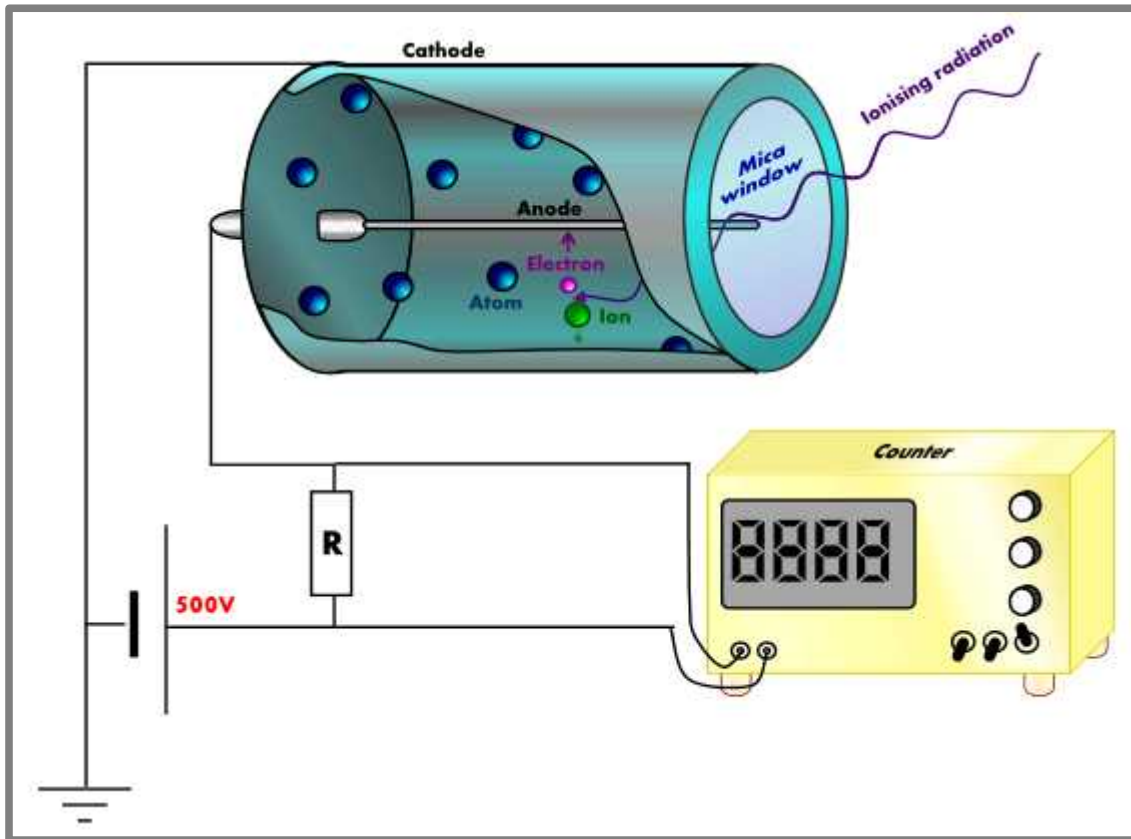


# БАК



- длина кольца 27 км
- 14 ТэВ в р-р  
столкновениях
- 3 ТэВ/нуклон в Рb-Рb  
столкновениях

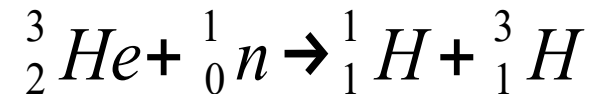
# Счётчик Гейгера



wikipedia.org, Geiger-Muller tube, [http://en.wikipedia.org/wiki/Geiger\\_Müller\\_tube](http://en.wikipedia.org/wiki/Geiger_Müller_tube)

Для ионизирующих излучений:  
детектируется импульс тока, усиленный образованием лавины вблизи тонкого электрода

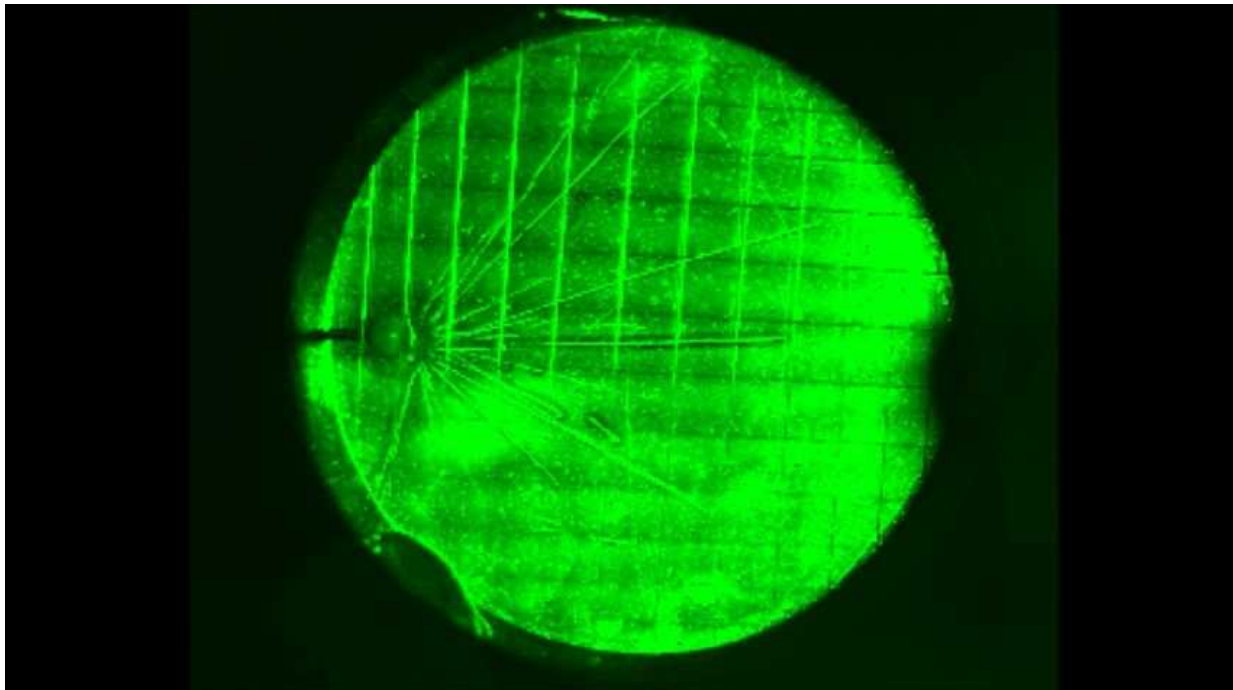
Для нейтронов  
наполняется гелием-3



# Камера Вильсона

Сделанная Ч.Вильсоном камера Вильсона. Из экспозиции музея Кавендишской лаборатории.

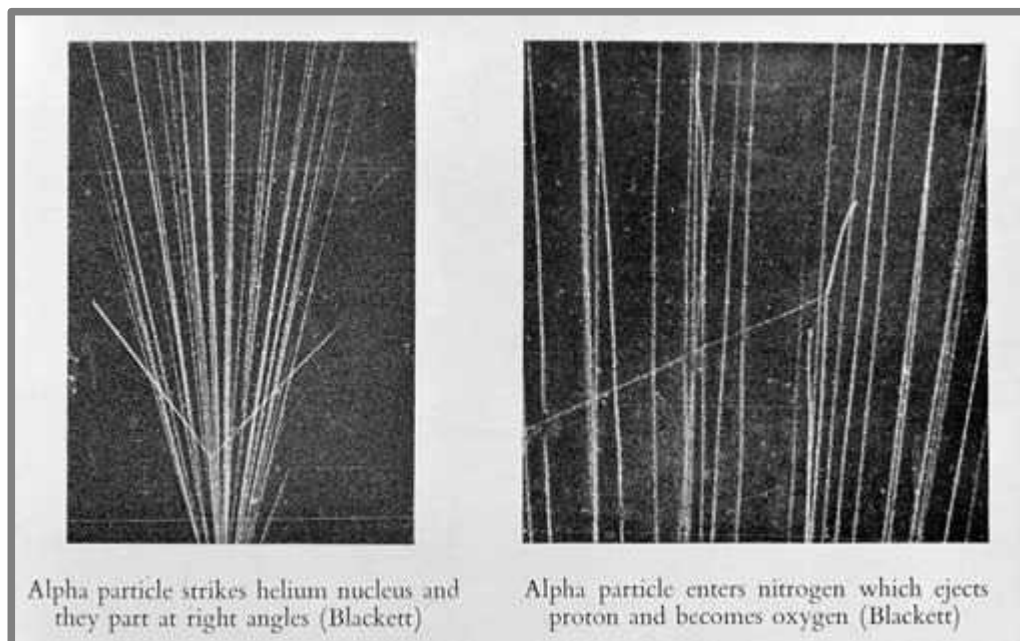
Memorial museum of Cavendish Laboratory, Wilson Chamber Discovery,  
<http://chambrebrouillard.wifeo.com/history-and-achievements.php>



← Детектирование альфа-частиц в камере Вильсона. Видео снято в демонстрационном кабинете кафедры общей физики МФТИ.

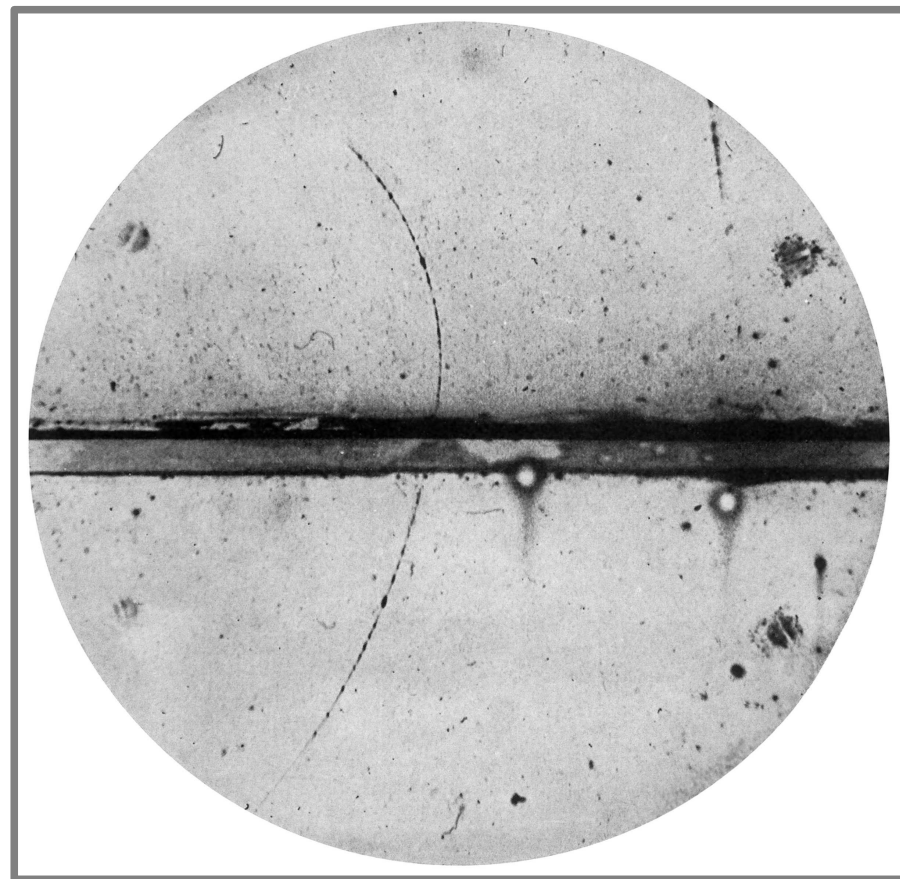


# Исторические фото в камере Вильсона



Ранние фотографии в камере Вильсона (получены Блэкеттом). Слева: рассеяние альфа-частицы на атоме гелия, угол  $90^\circ$  после столкновения свидетельствует о равенстве масс альфа частицы и атома гелия. Справа: взаимодействие альфа-частицы с ядром азота с образованием ядра кислорода и протона.

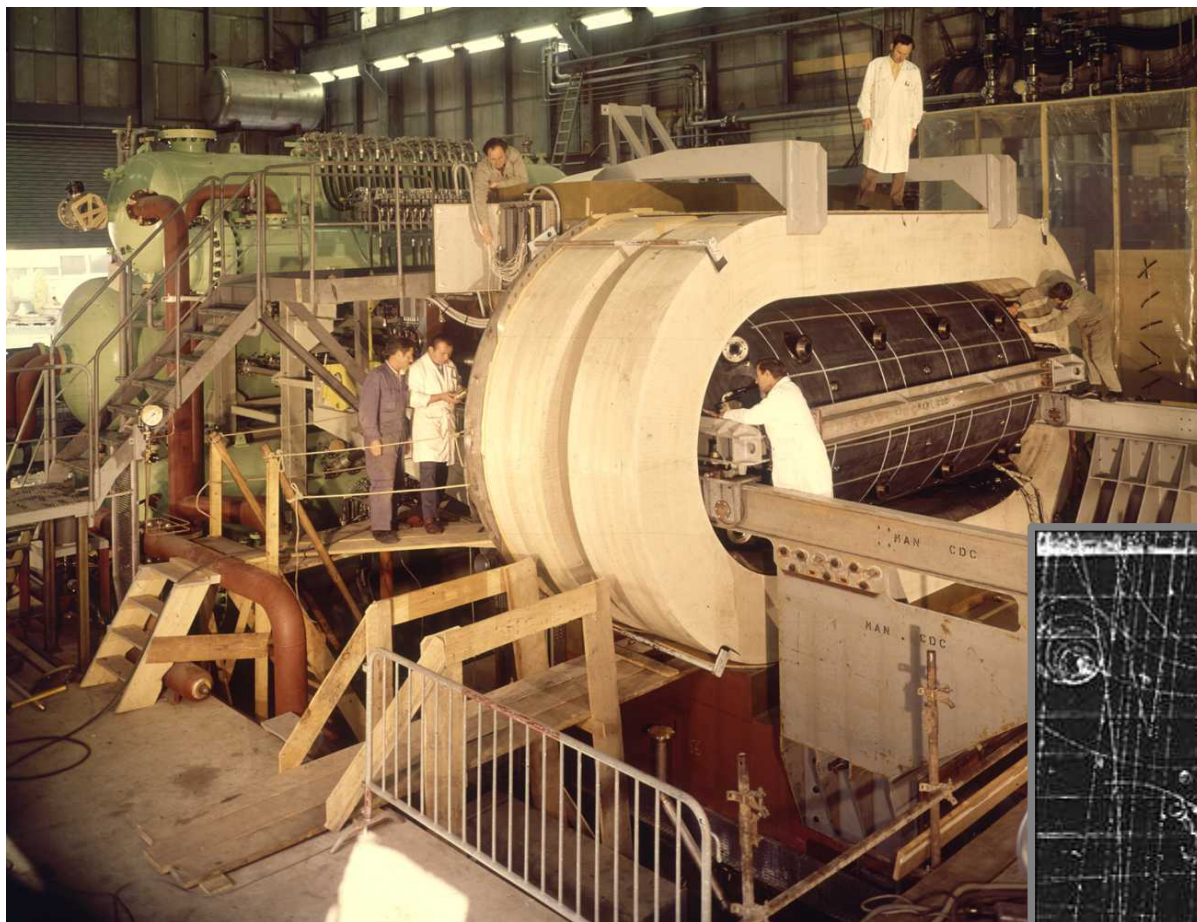
Historical tracks of alpha particles by Blackett,  
<http://www.courtauld.ac.uk/researchforum/events/2011/spring/Shows of London.shtml>



Трек первого достоверно обнаруженного позитрона в камере Вильсона (К.Андерсон). В центре кадра свинцовая пластина, большая кривизна трека в верхней части показывает, что позитрон прилетел снизу.

C.D.Anderson, The Positive Electron, Physical Review , 43, 491 (1933)

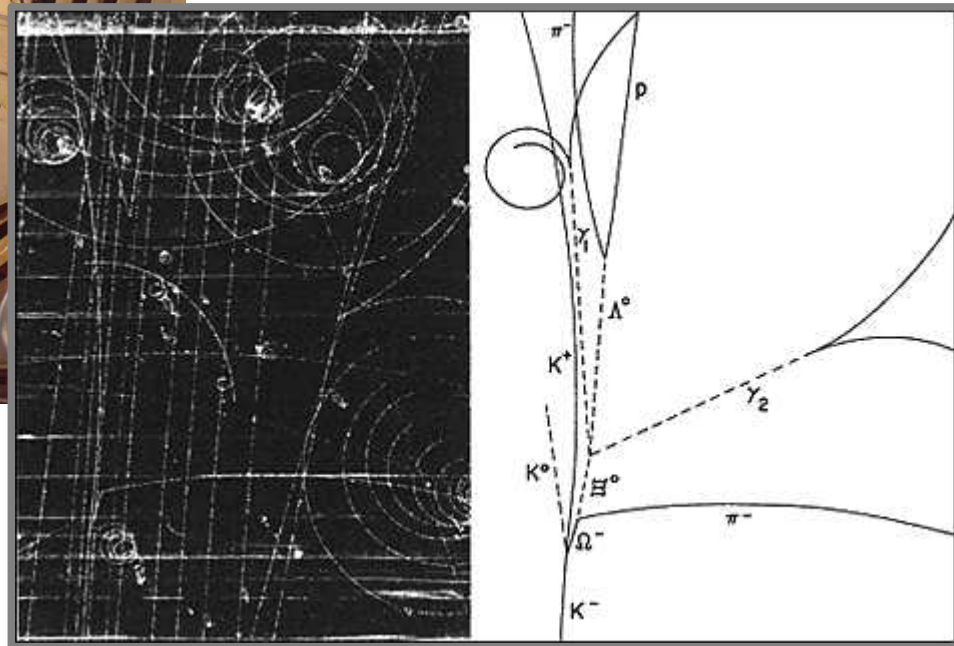
# Пузырьковая камера



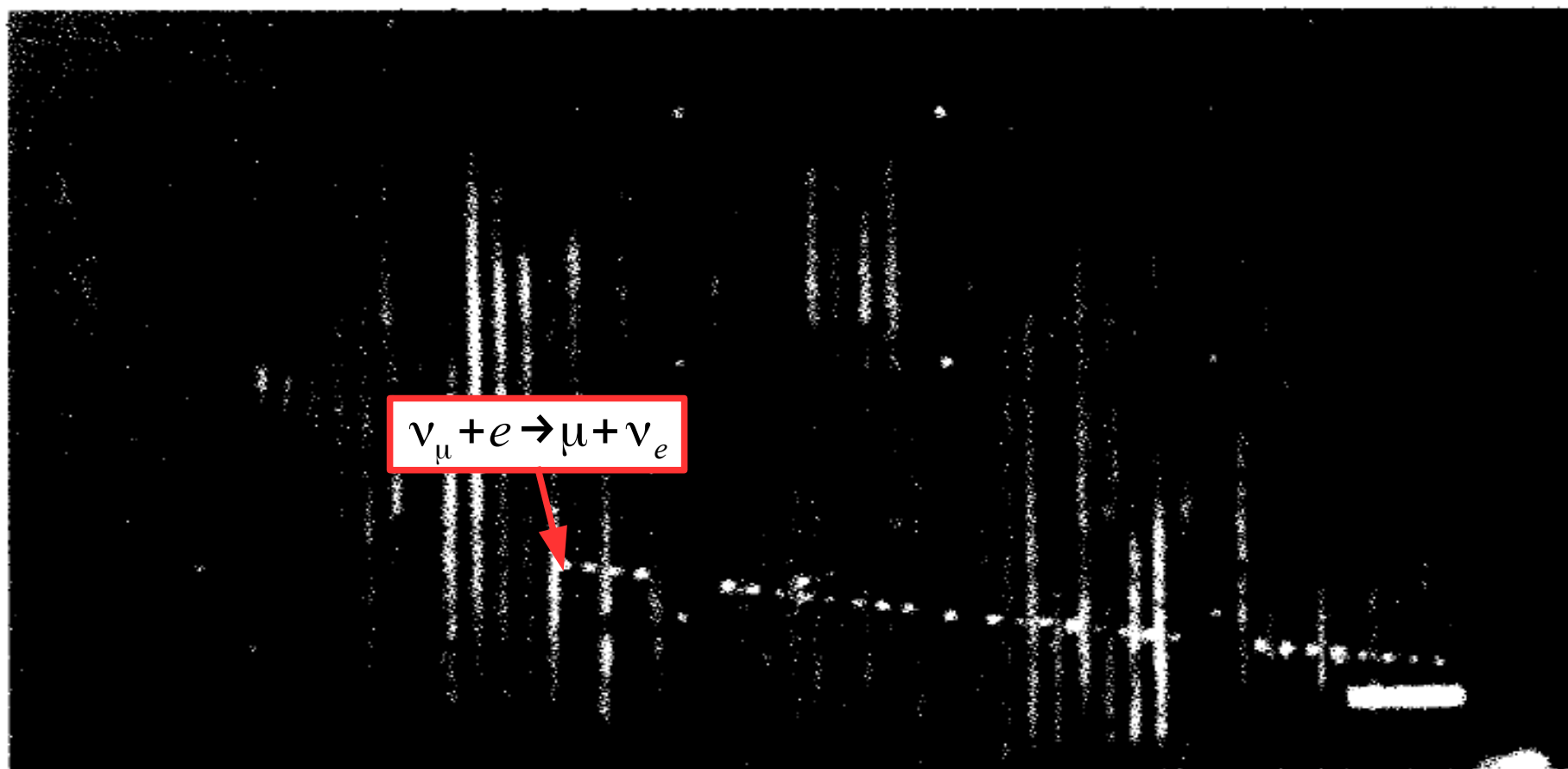
BNL, Historical tracks of Omega-minus particle,  
<http://www.bnl.gov/bnlweb/history/Omega-minus.asp>

## Пузырьковая камера Гаргамель (ЦЕРН)

CERN, CERN for teachers: Bubble Chambers,  
[http://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2005/bubble\\_chambers/BCwebsite/index.htm](http://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2005/bubble_chambers/BCwebsite/index.htm)



# Искровая камера



Возникновение мюона в искровой камере при поглощении мюонного нейтрино (почти горизонтальный трек). Вертикальные полосы - пластины искровой камеры. Из Нобелевской лекции Шварца

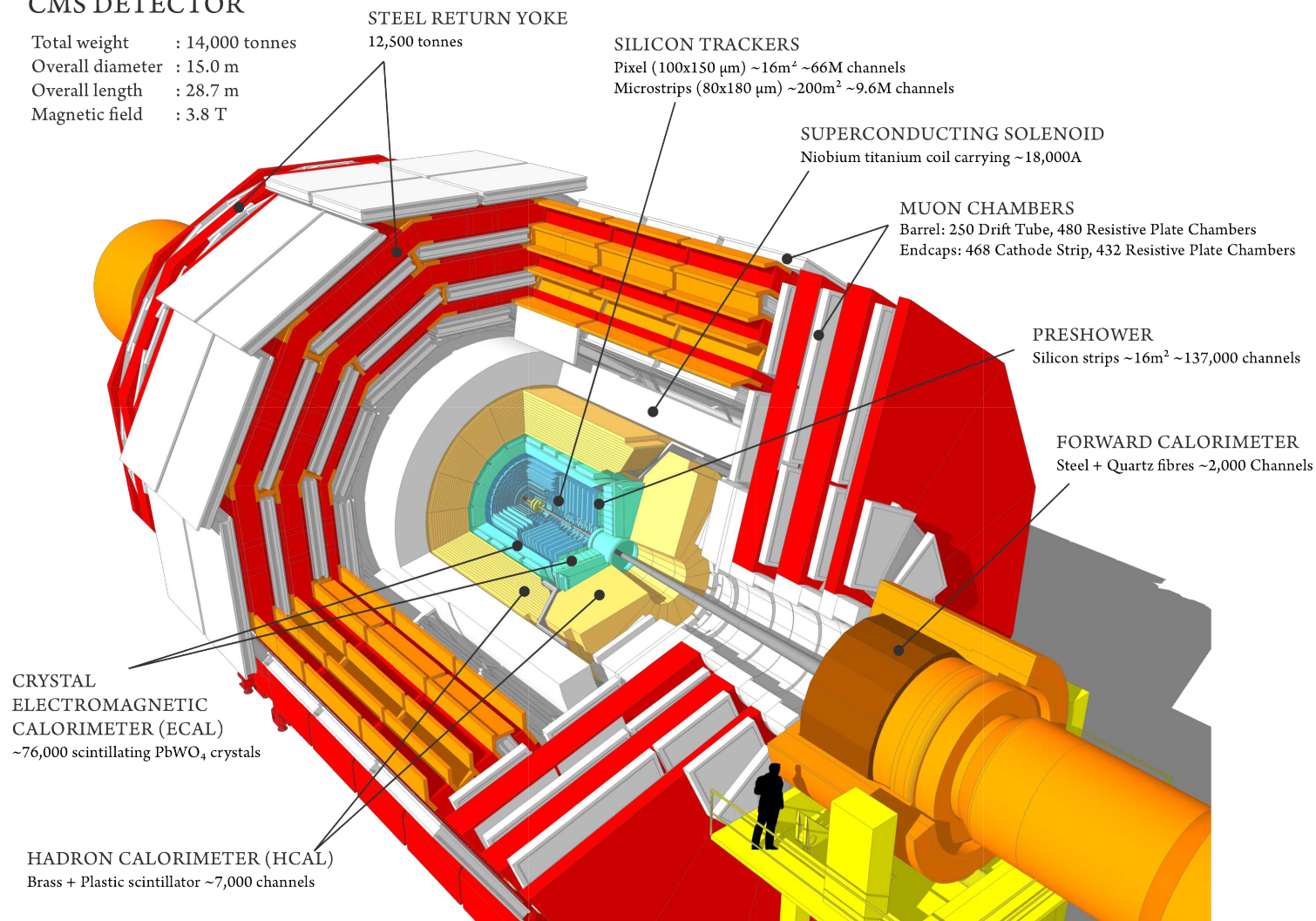


# Современные детекторы (БАК)

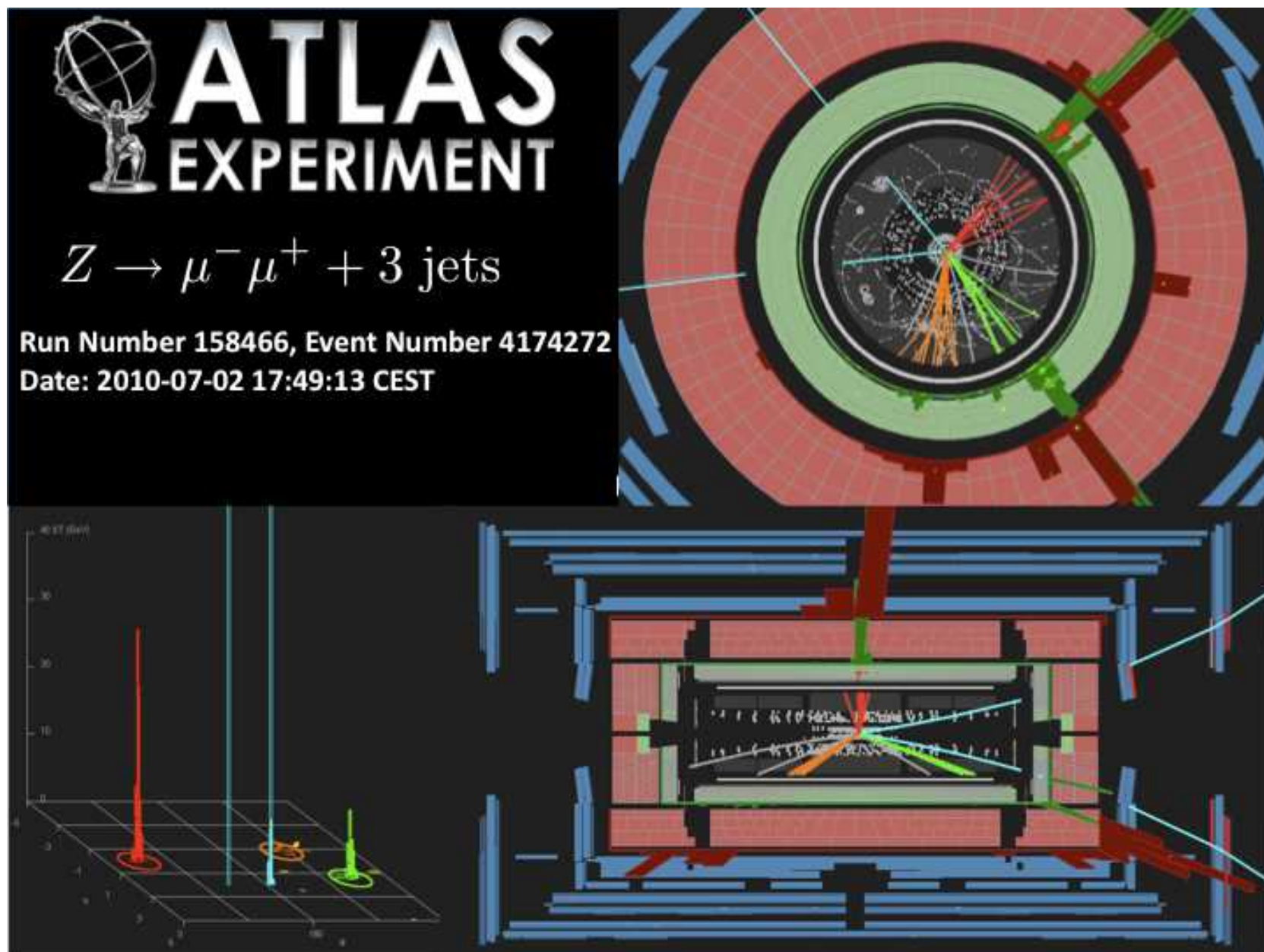


## CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes  
Overall diameter : 15.0 m  
Overall length : 28.7 m  
Magnetic field : 3.8 T



# Результат работы детектора БАК





# Основное на лекции

|          |                                                |                                              |                                              |                                      |                               |
|----------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| mass →   | $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$                  | $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$              | $\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$             | 0                                    | $\approx 126 \text{ GeV}/c^2$ |
| charge → | $2/3$                                          | $2/3$                                        | $2/3$                                        | 0                                    | 0                             |
| spin →   | $1/2$                                          | $1/2$                                        | $1/2$                                        | 1                                    | 0                             |
|          | <b>u</b><br>up                                 | <b>c</b><br>charm                            | <b>t</b><br>top                              | <b>g</b><br>gluon                    | <b>H</b><br>Higgs boson       |
| QUARKS   | $\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$                  | $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$                 | $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$               | 0                                    |                               |
|          | $-1/3$                                         | $-1/3$                                       | $-1/3$                                       | 0                                    |                               |
|          | $1/2$                                          | $1/2$                                        | $1/2$                                        | 1                                    |                               |
|          | <b>d</b><br>down                               | <b>s</b><br>strange                          | <b>b</b><br>bottom                           | <b><math>\gamma</math></b><br>photon |                               |
| LEPTONS  | $0.511 \text{ MeV}/c^2$                        | $105.7 \text{ MeV}/c^2$                      | $1.777 \text{ GeV}/c^2$                      | $91.2 \text{ GeV}/c^2$               |                               |
|          | -1                                             | -1                                           | -1                                           | 0                                    |                               |
|          | $1/2$                                          | $1/2$                                        | $1/2$                                        | 1                                    |                               |
|          | <b>e</b><br>electron                           | <b><math>\mu</math></b><br>muon              | <b><math>\tau</math></b><br>tau              | <b>Z</b><br>Z boson                  |                               |
|          | $< 2.2 \text{ eV}/c^2$                         | $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$                     | $< 15.5 \text{ MeV}/c^2$                     | $80.4 \text{ GeV}/c^2$               |                               |
|          | 0                                              | 0                                            | 0                                            | $\pm 1$                              |                               |
|          | $1/2$                                          | $1/2$                                        | $1/2$                                        | 1                                    |                               |
|          | <b><math>\nu_e</math></b><br>electron neutrino | <b><math>\nu_\mu</math></b><br>muon neutrino | <b><math>\nu_\tau</math></b><br>tau neutrino | <b>W</b><br>W boson                  |                               |
|          |                                                |                                              |                                              |                                      | GAUGE BOSONS                  |

